



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO PROVOCADO
PELA INCIDÊNCIA DE UM JATO VERTICAL EM FUNDO
PLANO**

MARIANE KEMPKA

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques

Co-Orientador: Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres

Banca Examinadora

Dr. Raúl Antonio Lopardo – INA/ AR

Prof. Dr. Mauricio Dai Prá – UFPEL

Prof^a. Dra. Daniela Guzzon Sanagiotto – UFRGS

Porto Alegre, dezembro de 2017.

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques e coorientação do Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres, ambos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Ao meu amado Rodrigo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus pelo dom da vida e pelas inúmeras oportunidades que me foram concedidas.

Não existem palavras que possam expressar o profundo agradecimento aos meus pais, Lidio e Silvia. Eu sou o que sou devido ao trabalho e amor em mim investidos.

Ao meu amor e porto seguro, Rodrigo. Por enxugar minhas lágrimas nos momentos difíceis e por ter me incentivado e encorajado a prosseguir mesmo quando eu achava que não conseguiria mais.

Ao professor Marcelo Giulian Marques, pela orientação e pelas oportunidades de aprendizado ao longo dos anos de convivência e, ainda, por ser um exemplo de profissional. Ao professor Luiz Augusto Magalhães Endres, pela coorientação e diversas discussões durante o desenvolvimento da pesquisa.

À minha amiga do coração, Joice, presente da pós-graduação. Pela companhia, pelos dias e noites na biblioteca, almoços no RU e no Antônio, finais de semana de estudo, por ser ombro amigo quando tudo deu errado, e pela torcida, quando as coisas começaram a dar certo novamente.

Aos amigos do Laboratório de Obras Hidráulicas, afinal uma pesquisa se faz a muitas mãos.

Aos meus colegas e amigos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, especialmente, ao coordenador do curso de Engenharia Civil, Edson Florentino, pela compreensão.

Ao CNPq pela concessão de bolsa de estudos.

À FURNAS Centrais Elétricas.

E finalmente, ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul por todas as oportunidades de aprendizado oferecidas.

RESUMO

Esta tese objetiva caracterizar o escoamento provocado pela incidência de um jato vertical em um fundo plano, descrevendo assim as características médias e flutuantes das pressões a partir da investigação experimental. O modelo utilizado é composto por um jato retangular posicionado, perpendicularmente, a uma distância de 0,92 m do fundo plano de um canal. Utilizando transdutores de pressão instalados na posição de incidência do jato, adquiriu-se os valores de pressão “instantânea” a uma frequência de 128 Hz durante 10 minutos. Foram ensaiadas cinco (5) vazões: 25 l/s ($Fr_1 = 7,12$), 30 l/s ($Fr_1 = 8,51$), 36,6 l/s ($Fr_1 = 10,35$), 42,7 l/s ($Fr_1 = 12,12$) e 50 l/s ($Fr_1 = 14,23$), além de vinte (20) diferentes espessuras de colchão d'água.

Com os dados de pressão, efetuou-se análises no domínio do tempo, da frequência e da posição. No domínio do tempo, analisou-se a variação dos parâmetros estatísticos essenciais (média, desvio padrão, assimetria e curtose) bem como a identificação de valores máximo e mínimos das pressões. No domínio da frequência, procurou-se avaliar por meio da análise espectral a identificação de frequências significativas associadas à energia macroturbulenta. No que tange à análise no domínio da posição buscou-se analisar a faixa de influência do jato junto ao fundo, a região de subpressões e o alcance das pressões dinâmicas. Outro aspecto importante abordado é a apresentação dos resultados em gráficos adimensionalizados, o que confere ao estudo um caráter geral dentro da faixa de valores ensaiados.

Os resultados definem um colchão mínimo de água da ordem de 3 vezes a altura crítica do escoamento, para o amortecimento das pressões dinâmicas. A análise dos momentos estatísticos demonstra que a distribuição das pressões não segue a distribuição normal. Dentro disso, estão disponibilizados coeficientes estatísticos de probabilidade para a determinação das pressões extremas. Ainda, estão definidas quatro zonas a jusante do impacto do jato: Zona I - região do impacto, Zona II - reflexão do jato, Zona III - Acomodação do escoamento e por fim, a Zona IV - caracterizada pelo fim da influência do jato. Além disso, uma análise deste escoamento sob a perspectiva da formação de um ressalto hidráulico é realizada, indicando que apenas os parâmetros utilizados, não descrevem o escoamento como tal.

Esta tese é produto da parceria entre Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LOH/IPH/UFRGS) e o Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos de Furnas Centrais Elétricas S. A. (LAHE/FURNAS).

Palavras-chave: Dissipação de energia. Jatos Direcionados. Pressões. Jatos Mergulhantes.

ABSTRACT

This thesis aims to characterize the flow prompted by the incidence of a vertical jet on a flat bottom, thus describing the mean and floating characteristics of the pressures from the experimental investigation. The model used is comprised of a rectangular jet positioned perpendicularly at a distance of 0.92 m from the flat bottom of a channel. Using pressure transducers installed in the jet incidence position, the "instantaneous" pressure values were acquired at a frequency of 128 Hz for 10 minutes. Five (5) discharges were tested: 25 l/s ($Fr1 = 7.12$), 30 l/s ($Fr1 = 8.51$), 36.6 l/s ($Fr1 = 10.35$), 42.7 l/s ($Fr1 = 12.12$) and 50 l/s ($Fr1 = 14.23$), as well as twenty (20) different waterbed thicknesses.

The pressure data were analyzed in terms of time, frequency and position domains. In the time domain, the variation of the essential statistical parameters (mean, standard deviation, asymmetry and kurtosis) was analyzed, as well as the identification of maximum and minimum pressure values. In the frequency domain, it was sought to assess, by means of the spectral analysis, the identification of significant frequencies associated with macroturbulent energy. Regarding the analysis in the position domain, this study aimed to analyze the range of influence of the jet near the bottom, the region of subpressions and the reach of the dynamic pressures. Another important aspect is the presentation of the results in dimensionless graphs, which grants the study a general character within the range of values tested.

The results define a minimum waterbed of the order of 3 times the critical height of the flow for the damping of the dynamic pressures. Statistical moments analysis shows that the distribution of pressures does not follow the normal distribution. Therein, probability statistical coefficients are available for the determination of extreme pressures. Also, four zones are defined downstream of the impact of the jet: Zone I - region of impact, Zone II - reflection of the jet, Zone III - accommodation of the flow and, finally, Zone IV - characterized by the end of the influence of the jet. Furthermore, an analysis of this flow from the perspective of the formation of a hydraulic jump is conducted, indicating that the parameters used alone do not describe the flow as such.

This thesis is a product of the partnership between the Hydraulic Works Laboratory of the Hydraulic Research Institute of the Federal University of Rio Grande do Sul

(LOH/IPH/UFRGS) and the Laboratory of Experimental Hydraulics and Hydraulic Resources of Furnas Centrais Elétricas SA (LAHE/FURNAS).

Keywords: Energy dissipation. Directed jets. Pressures. Impinging jets.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	23
2	Diretrizes da pesquisa.....	25
2.1	Objetivos do trabalho.....	25
2.1.1	Objetivo principal	25
2.1.2	Objetivos secundários.....	25
2.2	Delimitações	26
2.3	Pressuposto	26
2.4	Limitações	26
2.5	Delineamento.....	27
3	Revisão bibliográfica.....	29
3.1	Estruturas hidráulicas de dissipação	29
3.1.1	Classificação dos dissipadores de energia	29
3.1.2	Dissipadores – Grupo 1	30
	Tipo Concha – RollerBucket.....	30
	Bacia de dissipação por ressalto hidráulico	31
	Vertedouro em Degraus.....	31
3.1.3	Dissipadores – Grupo 2	32
	Dissipação por Jatos.....	32
	Dissipador tipo Salto Esqui.....	33
3.2	Jatos	35
3.2.1	Dispersão e Aeração.....	39
3.2.2	Espalhamento do Jato	40
3.2.3	Entrada no Colchão da água.....	44

3.2.4	Largura de Influência	51
3.3	Dissipação de energia	53
3.3.1	Turbulência como fator fundamental da dissipação de energia.....	53
3.3.2	Intensidade de turbulência	55
3.4	Esforços Hidrodinâmicos	57
3.4.1	Pressão média e pressão dinâmica junto ao fundo	57
3.4.2	Metodologias para previsão de pressões dinâmicas no impacto do jato.....	58
3.4.3	Flutuação de pressão	64
3.4.4	Frequências Dominantes	66
3.4.5	Modelo de difusão.....	70
3.5	Números adimensionais no estudo de dissipação de energia por jatos.....	75
3.6	Efeitos de escala.....	80
4	Metodologia.....	82
4.1	Metodologia de ensaio	84
4.2	Metodologia de análise	87
4.2.1	Avaliação do comprimento do núcleo (x_c) e do comprimento do jato submerso (x_k)	88
4.2.2	Análise da pressão média.....	89
4.2.3	Análise da Flutuação de pressão	89
4.2.4	Largura de Influência do Jato	89
4.2.5	Coeficiente de Assimetria	90
4.2.6	Coeficiente de Curtose.....	90
4.2.7	Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidades (N).....	91
4.2.8	Análise de Frequências	92
5	Resultados e discussões	93
5.1	Comprimento do núcleo do jato (x_c) e comprimento do jato submerso (x_k)	94

5.2	Caracterização das pressões médias e pressões dinâmicas ao longo do eixo de medição	96
5.3	Caracterização das flutuações de pressão ao longo do eixo de medição	99
5.4	Largura de Influência do Jato	100
5.5	O ponto de Impacto do Jato vertical	105
5.5.1	O coeficiente de pressão (C_p) no ponto de impacto do jato vertical.....	105
5.5.2	O coeficiente de flutuação de pressão (C_p') no ponto de impacto do jato	109
5.5.3	O coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades (N) no ponto de impacto do jato	113
5.5.4	Espectro de Frequências da Tomada Central	115
5.6	Avaliação das características longitudinais do escoamento a jusante do impacto do jato	118
5.6.1	A pressão dinâmica média adimensionalizada	118
5.6.2	Avaliação do coeficiente de pressão (C_p).....	120
5.6.3	Variação da distribuição longitudinal do coeficiente de flutuação de pressão (C_p').....	122
5.6.4	Distribuição Longitudinal do Coeficiente de assimetria (A_D) e do coeficiente de curtose (A_k)	124
5.6.5	Distribuição Longitudinal do Coeficiente Estatístico de Probabilidades (N)	127
5.6.6	Avaliação do Espectro de Frequências	131
5.6.7	Considerações acerca das características longitudinais do escoamento a jusante do impacto do jato	134
5.7	Avaliação do escoamento provocado pelo impacto do jato sob a perspectiva dos adimensionais associados ao ressalto hidráulico a jusante de vertedouro.....	136
5.7.1	O Ressalto clássico e os adimensionais característicos	138
6	Conclusões.....	146
7	Recomendações para trabalhos futuros.....	151
8	Referências Bibliográficas.....	152

9	Anexos	158
9.1	Anexo 01 - Pressões Médias e Dinâmicas Brutas	158
9.2	Anexo 02 - Comportamento das Flutuações de Pressão	160
9.3	Anexo 03 - Comportamento das pressões adimensionalizadas em função da posição (y/h)	162
9.4	Anexo 04 - Comportamento do coeficiente de pressão (C_p) em função da posição (y/h)	164
9.5	Anexo 05 - Comportamento do coeficiente de flutuação de pressão (C_p') em função da posição (y/h)	166
9.6	Anexo 06 - Comportamento do coeficiente estatístico de pressões N em função da posição (y/h)	168
9.7	Anexo 07 - Análise espectral para as tomadas distribuídas longitudinalmente ao canal	172

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de alguns tipos de dissipadores de energia.	30
Figura 2 – Dissipador de energia tipo <i>Roller Bucket</i>	31
Figura 3 – Tipos de dissipadores por jatos: a) Dissipador por orifício; b) descarregador de superfície; c) salto esquí.	32
Figura 4 – Variáveis envolvidas no estudo dos jatos.	34
Figura 5 – Esboço do jato incidente.	35
Figura 6 – (a) Ressalto Circular. (b) Ressalto Radial (seção transversal e vista em planta).	36
Figura 8 – Formação de ressalto hidráulico a jusante de uma comporta.	37
Figura 9 – Localização das variáveis e pontos de medição.	41
Figura 10 – Dados teóricos e experimentais do comprimento de quebra de um jato circular.	42
Figura 11 – Comparação entre a espessura do jato no impacto (B_j) medida e calculada.	44
Figura 12 – Difusão do jato, onde α_1 é o ângulo de contração do núcleo, α_2 é o ângulo da camada cisalhante e x_c é o comprimento de desenvolvimento do núcleo.	46
Figura 13 – Difusão de um jato no colchão ilimitado. (a) jato submerso; (b) jato quase laminar; (c) jato turbulento liso; e (d) jato altamente turbulento.	48
Figura 14 – faixa de influência da pressão junto da soleira.	52
Figura 15 – Distribuição de pressões dinâmicas médias para as diferentes equações apresentadas.	61
Figura 16 – Variação da amplitude máxima de flutuação com profundidade do colchão (adaptado de YUDITSKII, 1985).	66
Figura 18 – Estruturas de vórtices no interior da bacia de dissipação.	67
Figura 19 – Densidade do espectro de potências (P_{xx}) em termos da velocidade: à esquerda, tem-se os espectros respectivos a bacia com fundo plano (FB); e a direita, bacia confinada (FC). ..	69
Figura 20 – Densidade espectral para a condição em que o núcleo do jato, no momento do impacto, está plenamente desenvolvido.	70
Figura 21 – Padrões de difusão de jatos imergentes de acordo com o modelo LDDM.	71
Figura 22 – Comparação entre a energia E_2 medida e a energia E_2 calculada.	74

Figura 23 – Coeficiente de pressão dinâmica para $h/B = 0,35$ em função da profundidade relativa	76
Figura 24 – Coeficiente de pressão média dinâmica para jatos retangulares e escoamentos com quedas sucessivas.	77
Figura 25 – Esquema do modelo utilizado para a coleta de dados.	82
Figura 26 – Sistema de alimentação do modelo.	83
Figura 27 – Porção superior do modelo, onde se localiza a estrutura que direciona o escoamento ao bocal.	83
Figura 28 – Bocal do jato direcionado.....	84
Figura 29 – Imagem do jato incidindo perpendicularmente ao fundo do canal, $Fr_1 = 7,12$	84
Figura 30 – Avaliação do tempo de coleta de dados. Os valores de pressão média correspondem a $Fr_1 = 14,23$ - $S = 2$	85
Figura 31 – Avaliação do tempo de coleta de dados. Os valores de desvio padrão correspondem a $Fr_1 = 14,23$ - $S = 2$	85
Figura 32 – Esquema da porção instrumentalizada do canal.	86
Figura 33 – Espectro em função do número de onda.	92
Figura 34 – Comportamento da pressão para $Fr_1 = 10,35$: (a) pressões médias (b) pressões média dinâmicas.	97
Figura 35 – Pressões médias dinâmicas: (a) submersão 1; (b) submersão 1,5; (c) submersão 2 e (d) submersão 2,5.....	98
Figura 36 - Aumento do ângulo de espalhamento no momento em que o jato entra na massa de água.	99
Figura 37 – Comportamento da flutuação de pressão para $Fr_1 = 10,35$	99
Figura 38 - Medição do ângulo de espalhamento para $Fr_1 = 10,35$	100
Figura 39 - Comparação entre os adimensionais obtidos com as propostas 1 e 2 e com a indicação de Beltaos (1976).	102
Figura 40 – Comparação dos resultados adimensionais obtidos com a propostas 3 e com a indicação de Beltaos (1976).	103

Figura 41 - Resultados adimensionais obtidos com a propostas 3, com a indicação de Beltaos (1976) e o ajuste proposto.	104
Figura 42 – Coeficiente de pressão dinâmica (C_p) para os dados obtidos na presente pesquisa.	106
Figura 43 – Comparação entre os resultados da presente pesquisa com os resultados de demais pesquisadores.....	107
Figura 44 – Relação da pressão máxima com a energia no início do lançamento em função da submergência.....	108
Figura 45 – Relação entre a pressão média máxima ($P_{m\acute{a}x}$) e a energia máxima do jato ($E_{m\acute{a}x}$) em função da relação entre a espessura do colchão d'água (h) e a profundidade crítica do escoamento (h_{cr}).....	108
Figura 46 – Relação entre a pressão dinâmica máxima ($P_{dm\acute{a}x}$) e a energia máxima do jato ($E_{m\acute{a}x}$) em função da relação entre a espessura do colchão d'água (h) e a profundidade crítica do escoamento (h_{cr}).....	109
Figura 47 – Flutuação de pressão no ponto de impacto do jato em função da espessura do colchão d'água.....	110
Figura 48 – Coeficientes de flutuação de pressão obtidos por diferentes autores e comparados com os resultados obtidos.	111
Figura 49 – Comparação entre os coeficientes de flutuação de pressão obtidos por Castillo (1989, 2006) e Puertas (1994) e os coeficientes encontrados no estudo em questão.	112
Figura 50 – Relação da flutuação de pressão máxima com a energia máxima no ponto de lançamento do jato em função da relação entre a espessura do colchão d'água e a altura crítica do escoamento.	112
Figura 51 – Coeficiente de assimetria no ponto de impacto do jato em função da submergência.	114
Figura 52 – Coeficiente de curtose no ponto de impacto do jato em função da submergência.	114
Figura 53 – Coeficiente estatístico N para as pressões com diferentes probabilidades de ocorrência no ponto de impacto do jato.....	115
Figura 54 - Espectro de Frequências para o ponto de impacto do jato.....	116
Figura 55 – Pressões dinâmicas adimensionalizadas em função da relação entre a distância do ponto de impacto e a espessura do colchão d'água para $Fr_1 = 10,35$	118

Figura 56 – Pressões dinâmicas adimensionalizadas em função da relação entre a distância do ponto de impacto e a espessura do colchão d'água para ensaios com $S=1$	119
Figura 57 – Pressões dinâmicas adimensionalizadas em função da relação entre a distância do ponto de impacto e a espessura do colchão d'água para ensaios com $S > 1$	120
Figura 58 – Comportamento do adimensional C_p em função da relação y/h para $Fr_1 = 10,35$	121
Figura 59 – Comportamento da distribuição longitudinal do coeficiente de pressão (C_p) em função da relação y/h para todas as situações de ensaio.	121
Figura 60 – Comportamento do coeficiente de flutuação de pressão (C_p') em função da relação y/h para $Fr_1 = 10,35$	122
Figura 61 – Comportamento do coeficiente de flutuação de pressão (C_p') em função da relação y/h para o grau de submergência igual a um ($S = 1$).	123
Figura 62 – Comportamento do coeficiente de flutuação de pressão (C_p') em função da relação y/h para as submergências maiores que 1 ($S > 1$).	123
Figura 63 – Coeficientes de assimetria.	124
Figura 64 – Coeficientes de assimetria com maior detalhe.	125
Figura 65 - Influência da espessura do colchão d'água no potencial de subpressões a jusante do impacto: (a) $Fr_1 = 7,12$ $S = 1$, (b) $Fr_1 = 8,51$ $S = 1$, (c) $Fr_1 = 10,35$ $S=1$ e (d) $Fr_1 = 12,12$ $S = 1$	126
Figura 66 – Coeficientes de curtose.	127
Figura 67 – Coeficiente estatístico para pressões com probabilidade de 0,1% de não excedência.	128
Figura 68 – Coeficiente estatístico para pressões com probabilidade de 0,01% de não excedência.	128
Figura 69 – Coeficiente estatístico para probabilidade de 99%	129
Figura 70 – Coeficiente estatístico para probabilidade de 99,9%	129
Figura 71 – Ajuste proposto para o cálculo do coeficiente de distribuição de probabilidades (N).	130
Figura 72 – Espectro de frequências para a tomada 9, 1° tomada a jusante do impacto do jato, todos números de Froude (Fr_1) e todos os graus de submergência.	132

Figura 73 – Espectro de frequências para a tomada 1, última posição de tomada de pressão, todos números de Froude (Fr_1) e todos os graus de submergência.	133
Figura 74 - Delimitação das zonas do escoamento provocado pelo impacto do jato.	135
Figura 75 – Ressalto hidráulico a jusante de vertedouro com calha lisa e com curva de concordância entre vertedouro e bacia de dissipação.	136
Figura 76 – Ressalto hidráulico a jusante de vertedouro em degraus, sem concordância entre vertedouro e bacia de dissipação.	137
Figura 77 – Ressalto Livre: a) esquema da configuração de ressalto livre; b) ressalto livre a jusante do impacto do jato pra $Fr_1 = 7,12$ e $S < 1$	137
Figura 78 – Ressalto clássico: a) esquema da configuração do ressalto clássico; b) ressalto clássico a jusante do impacto do jato pra $Fr_1 = 10,35$ e $S = 1$	138
Figura 79 – Ressalto afogado: a) esquema da configuração do ressalto afogado; b) ressalto afogado/submerso a jusante do impacto do jato $Fr_1 = 10,35$ e $S = 2$	138
Figura 80 - Pressões médias adimensionalizadas - Grau de Submergência: 1.	140
Figura 81 - Pressões médias adimensionalizadas comparadas com os resultados de Dai Prá (2011).	141
Figura 82 - Pressões médias adimensionalizadas comparadas com os resultados de Novakoski (2016).	141
Figura 83 - Flutuações de pressão adimensionalizadas para submergência 1.	143
Figura 84 - Flutuações de pressão adimensionalizadas comparadas com as flutuações no ressalto hidráulico a jusante de vertedouro de calha lisa.	144
Figura 85 - Flutuações de pressão adimensionalizadas comparadas com as flutuações no ressalto hidráulico a jusante de vertedouro em degraus sem curva de concordância.	144
Figura 86 - Comparação entre os coeficientes de assimetria obtidos para o impacto do jato vertical com os obtidos a jusante de vertedouro de calha lisa, com curva de concordância. ...	145
Figura 87 - Comparação entre os coeficientes de assimetria obtidos para o impacto do jato vertical e para o ressalto hidráulico a jusante de vertedouro em degraus sem curva de concordância.	145
Figura 88 – Comportamento da pressão para $Fr_1 = 7,12$: (a) pressões médias (b) pressões média dinâmicas.	158

Figura 89 – Comportamento da pressão para $Fr_1 = 8,51$: (a) pressões médias (b) pressões média dinâmicas.	158
Figura 90 – Comportamento da pressão para $Fr_1 = 10,35$: (a) pressões médias (b) pressões média dinâmicas.	158
Figura 91 – Comportamento da pressão para $Fr_1 = 12,12$: (a) pressões médias (b) pressões média dinâmicas.	159
Figura 92 – Comportamento da pressão para $Fr_1 = 14,23$: (a) pressões médias (b) pressões média dinâmicas.	159
Figura 93 – Flutuações de pressão em função da distância do ponto de impacto: (a) $Fr_1 = 7,12$; (b) $Fr_1 = 8,51$; (c) $Fr_1 = 10,35$; (d) $Fr_1 = 12,12$ e (e) $Fr_1 = 14,23$	161
Figura 94 – Pressões dinâmicas adimensionalizadas em função da relação entre a distância do ponto de impacto e a espessura do colchão d'água: (a) $Fr_1 = 7,12$; (b) $Fr_1 = 8,51$; (c) $Fr_1 = 10,35$; (d) $Fr_1 = 12,12$ e (e) $Fr_1 = 14,23$	163
Figura 95 – Comportamento do coeficiente de pressão (C_p) em função da posição (y/h) para: (a) $Fr_1 = 7,12$; (b) $Fr_1 = 8,51$; (c) $Fr_1 = 10,35$; (d) $Fr_1 = 12,12$ e (e) $Fr_1 = 14,23$	165
Figura 96 – Comportamento do coeficiente de flutuação de pressão (C_p') em função da relação y/h para: (a) $Fr_1 = 7,12$; (b) $Fr_1 = 8,51$; (c) $Fr_1 = 10,35$; (d) $Fr_1 = 12,12$ e (e) $Fr_1 = 14,23$	167
Figura 97 – Coeficiente estatístico de probabilidades (N) em função da relação y/h para: (a) 5%; (b) 10%; (c) 20%; (d) 30%; (e) 40%; (f) 50%; (g) 60%; (h) 70%; (i) 80%; (j) 90% e (k) 95%.	171
Figura 98 – Análise de frequências (não adimensionalizada) $Fr_1 = 7,12$; (a) $S=1.0$; (b) $S=1.5$; (c) $S=2.0$ e (d) $S=2.5$	173
Figura 99 – Análise de frequências (não adimensionalizada) $Fr_1 = 8,51$; (a) $S=1.0$; (b) $S=1.5$; (c) $S=2.0$ e (d) $S=2.5$	174
Figura 100 – Análise de frequências (não adimensionalizada) $Fr_1 = 10,35$ (a) $S=1.0$; (b) $S=1.5$; (c) $S=2.0$ e (d) $S=2.5$	175
Figura 101 – Análise de frequências (não adimensionalizada) $Fr_1 = 12,12$; (a) $S=1.0$; (b) $S=1.5$; (c) $S=2.0$ e (d) $S=2.5$	177
Figura 102 – Análise de frequências (não adimensionalizada) $Fr_1 = 14,23$; (a) $S=1.5$; (b) $S=2.0$ e (c) $S=2.5$	177

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetro das equações de previsão de calculo das pressões dinâmicas médias nas proximidades do ponto de estagnação.	60
Tabela 2 – Coeficientes K e w para formula geral.	64
Tabela 3 – Características dos ensaios realizados.	87
Tabela 4 – Comprimento do núcleo do jato.	94
Tabela 5 – Espessura do colchão d'água(h) e comprimento do jato submerso (x_k), segundo Cola (1965).	95
Tabela 6 – Espessura do colchão d'água (h) para os ensaios que correspondem à submergência 1	96
Tabela 7 – Comprimento da zona de impacto ($b/(H-h)$) calculada pelas diferentes propostas.	101
Tabela 8 – Ângulo de espalhamento para $Fr_1 = 10,35$	103

LISTA DE SÍMBOLOS

b_{J-A}	Distância núcleo até a interface jato-atmosfera
b	Zona de influência do jato
f_a	Frequência de amostragem
f	Número de onda
f_f	Frequência na densidade espectral
f_N	Frequência de Nyquist
g	Aceleração gravitacional
h	Espessura do colchão d'água
h_1	Altura conjugada rápida
h_2	Altura conjugada lenta
h_{cr}	Profundidade crítica
h_f	Medida do fundo da fossa até a superfície do colchão d'água
h_L	Altura da lâmina de água sobre a crista vertedoura
h_o	Colchão efetivo
h_p	Profundidade do poço de acumulação
g	Aceleração gravitacional
n	Tamanho da amostra
q	Vazão específica
r	Coeficiente para o cálculo de B_j
u'	Valor quadrático médio das flutuações de velocidades axiais
v'	Componente turbulenta na direção do escoamento
w	Expoente para o cálculo de ΔP_{MAX}
x	Distância longitudinal ao jato medida a partir do lançamento
x_a	Distância da superfície até a zona de choque
x_c	Comprimento de desenvolvimento do núcleo
x_f	Comprimento do núcleo do jato caindo na atmosfera
x_k	Comprimento do jato submerso
y	Distância horizontal do ponto de impacto do jato
A_D	Coeficiente de assimetria
A_{D1}	Adimensional
A_{D2}	Adimensional
A_{D3}	Adimensional
A_k	Coeficiente de curtose
B	Largura do bocal
B_j	Largura do jato na entrada do colchão d'água
B_p	Perímetro do bocal
B_t	Espessura do bocal

C	Coeficiente de turbulência
C_{air}	Concentração média de ar
Cd	Coeficiente de difusão
Cp	Coeficiente adimensional de pressão
Cp'	Coeficiente adimensional de flutuação de pressão
Cv	Coeficiente que depende das condições de difusão
$C\tau$	Coeficiente de tensão cisalhante
D_0	Diâmetro do jato no lançamento
D_c	Diâmetro médio do núcleo
D_i	Diâmetro do jato no impacto
E_1	Energia cinética na entrada do colchão d'água
E_2	Energia no ponto de impacto
E_{hp}	Energia dissipada no ressalto hidráulico
$E_{MÁX}$	Energia máxima (Potencial + Cinética)
FB	Bacia fundo plano
FC	Bacia confinada
Fr	Número de Froude
Fr_0	Número de Froude no lançamento do jato
Fr_1	Número de Froude Rápido
Fr_2	Número de Froude Lento
Fr_b	Número de Froude no bocal
H	Distância vertical do ponto de lançamento do jato até o fundo do canal
K	Coeficiente para o cálculo da pressão dinâmica máxima e sua distribuição
L	Comprimento do poço de acumulação
N	Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades
Nq	Número de queda
P	Pressão medida no ponto
P'	Flutuação de pressão
P_{atm}	Pressão atmosférica
P_{axis}	Pressão na linha central do jato
P_d	Pressão dinâmica
$P_{dmáx}$	Pressão dinâmica máxima
$P_{mín}$	Pressão mínima
P_m	Pressão média
$P_{mmáx}$	Pressão máxima média
P_{ref}	Pressão de referência
$P_{x\%}$	Pressão com x probabilidade de ocorrência
P_{xx}	Densidade do espectro de potência
$P_{y/h}$	Pressão dinâmica média na posição y/h
Q	Vazão

R_0	Raio do jato
Re_b	Número de Reynolds no bocal
S	Grau de submersão
S_t	Número de Strouhal
Tu	Intensidade de turbulência
V	Velocidade média do jato
V_0	Velocidade de saída do jato
V_1	Velocidade na seção rápida do escoamento
V_b	Velocidade no bocal
V_H	Velocidade pela altura de queda
V_j	Velocidade do jato na entrada do colchão d'água
V_m	Velocidade mínima para entrada de ar
$V_{max,x}$	Velocidade máxima na linha central na distancia x
V_x	Velocidade na distância x
We_b	Número adimensional de Webber
α	Angulo de difusão
α_1	Angulo de contração do núcleo
α_2	Angulo de espalhamento
β	Entrada de ar
β_A	Zona de choque
Γ	Posição adimensionalizada
ϵ	Densidade espectral adimensionalizada
ζ	Probabilidade em valores decimais
ε	Espalhamento lateral do jato
η	Eficiência na dissipação
Θ	Fator de correção
λ	Relação de escala
λ_{max}	Amplitude máxima da flutuação de pressão
ρ_j	Massa específica do jato na entrada do colchão d'água
ρ_w	Massa específica da água
σ	Desvio Padrão
v'	Componente da velocidade turbulenta na direção do escoamento
Υ	Peso específico da água
ϕ	Ângulo entre o jato incidente e a soleira
Ψ	Pressão média adimensionalizada
Ω	Parâmetro de definição da turbulência
φ	Expoente para o cálculo de $P_{y/h}$
χ	Adimensional de flutuação de pressão a jusante de vertedouros

ABREVIATURAS

LDDM	Limited-depth diffusion model
PC	UHE Porto Colômbia

1 INTRODUÇÃO

A utilização de usinas hidrelétrica, no Brasil, iniciou-se ainda no século XIX, motivada pela necessidade de movimentar bombas utilizadas na extração de diamantes. Passados 135 anos, o potencial hidrelétrico utilizado no país chega a quase 90 GW (PEREIRA, 2015). Sendo assim, vê-se que a hidroeletricidade desempenha papel importante na integração e no desenvolvimento de regiões distantes dos grandes centros urbanos e industriais. De acordo com o governo federal, no ano de 2014, as usinas hidrelétricas foram responsáveis por mais de 75% da eletricidade no país. Vale lembrar que a matriz energética mundial é composta por 13% de fontes renováveis no caso de países industrializados, caindo para 6% entre as nações em desenvolvimento. De acordo com Brasil (2014), para a área das hidrelétricas, foram previstos cerca de 83 bilhões de reais para serem investidos entre 2017 a 2030.

Dentre as diversas estruturas que integram uma usina hidrelétrica, destacam-se os vertedouros e os dissipadores de energia. Os vertedouros têm a função de descarregar, com segurança, a enchente máxima prevista no estudo hidrológico. Este volume de água excedente possui uma grande quantidade de energia, em geral, atribuída às altas quedas e às elevadas velocidades. Sendo assim, ao escoar, é necessário que parte dessa energia seja dissipada a fim de não causar danos a jusante do vertedouro.

A construção de descarregadores de cheias em que a dissipação de energia se efetua no leito natural é uma solução bastante incentivada, sempre que as condições locais o permitam, por evitar a construção de uma obra de concreto.

Para minimizar os efeitos devido às perturbações introduzidas no regime natural de um escoamento pela execução de uma obra hidráulica, torna-se indispensável que a restituição das vazões, temporariamente retidas ou desviadas, se faça em condições que se aproximem o máximo possível das condições naturais. Para satisfação deste princípio, as estruturas de dissipação de energia constituem, pela sua função e dimensões, um dos elementos fundamentais a ter em conta na concepção das obras anexas aos aproveitamentos hidrelétricos, controle e regularização de cheias (RAMOS, 1982). O controle da dissipação de energia em estruturas hidráulicas tem como meta evitar problemas como erosões regressivas, cavitação, sobre e subpressões que podem comprometer a segurança da obra.

Sendo assim, o estudo dos esforços hidrodinâmicos provocados pela incidência de jatos dissipadores de energia, bem como as pressões provocadas por ressalto hidráulico vão ao encontro da otimização dos projetos das obras civis dos dissipadores, reduzindo custos de implantação, sem provocar redução na confiabilidade e segurança da estrutura. Segue, ainda, que o estabelecimento de uma metodologia de estimativas destes esforços vem corroborar com este cenário.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes que orientam este trabalho estão apresentadas neste capítulo.

2.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e serão apresentados na sequência.

2.1.1 Objetivo principal

O objetivo principal desta tese é caracterizar o escoamento provocado pela incidência de um jato vertical em um fundo plano, de maneira a permitir a descrição e previsão das características médias e flutuantes das pressões a partir da investigação experimental em modelo físico.

2.1.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários são:

- adquirir e analisar as grandezas hidráulicas médias e flutuantes a partir de amostras representativas do ponto de vista da taxa de aquisição e do tempo de amostragem;
- validar as características hidráulicas do escoamento obtidas experimentalmente a partir das proposições encontradas na bibliografia técnica;
- analisar o comprimento do núcleo do jato e o comprimento do jato submerso;
- analisar a largura de influência do jato sob a perspectiva das pressões médias e dinâmicas;
- analisar a região do ponto de impacto do jato sob a perspectiva das pressões médias e dinâmicas;
- analisar o comportamento do coeficiente de pressão (C_p);
- analisar o comportamento coeficiente de flutuação de pressão (C_p');

- estabelecer um coeficiente estatístico de probabilidades (N) que auxilie na estimativa das pressões extremas;
- analisar o espectro de frequências das amostras de pressão;
- analisar a distribuição dos coeficientes de assimetria e curtose;
- verificar a possibilidade da utilização dos adimensionais utilizados na previsão de pressões médias, flutuantes e extremas que ocorrem em bacias de dissipação por ressalto hidráulico.

2.2 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo das pressões provocadas por um jato vertical em um canal de fundo plano, a partir de metodologias empíricas e, por isso, devem ser respeitados os intervalos das condições de contorno e evitar extrapolações.

2.3 PRESSUPOSTO

Admite-se que é possível caracterizar o escoamento provocado pelo impacto do jato em um fundo plano a partir da distribuição longitudinal das pressões médias e suas flutuações e que, a jusante do impacto do jato, ocorre a formação de um ressalto hidráulico.

2.4 LIMITAÇÕES

São limitações da pesquisa:

- a vazão máxima de ensaio e, conseqüentemente, as faixas em que se encontram os números adimensionais de Froude, Reynolds e Número de Queda;
- a energia potencial (queda livre do jato);
- o grau de aeração do jato;
- a intensidade de turbulência;
- a largura do bocal adotado.

2.5 DELINEAMENTO

Os ensaios para obtenção dos dados foram realizados em modelo reduzido, através do qual foi possível medir as pressões provocadas pela incidência de um jato de água incidindo, perpendicularmente, sobre o fundo plano de um canal.

A definição do programa experimental e a prática de laboratório foram etapas realizadas durante o andamento do P&D “Estudo dos processos geomecânicos provocados por esforços hidrodinâmicos em fossas de erosão a jusante de salto esquí” em uma parceria firmada entre Furnas Centrais Elétricas S.A, Fundação de Apoio da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – FAURGS e Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) através do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) no ano de 2008 e findada em 2012.

Após as diretrizes de pesquisa no presente capítulo, é apresentada, no capítulo seguinte, a Revisão bibliográfica, página 29, cujo objetivo é contextualizar a problemática de vertedouros/dissipadores por jatos, além de reunir material necessário ao embasamento teórico relacionado à pesquisa.

No capítulo 4, Metodologia, na página 82, é preceituada a geometria e dimensões do modelo físico utilizado, a metodologia empregada na realização dos ensaios, bem como a metodologia de análise dos dados.

Os resultados obtidos são apresentados no capítulo 5, Resultados e discussões, na página 93, desenvolvendo-se, ainda, considerações pertinentes e discussões frente aos resultados e propostas dos pesquisadores referidos no capítulo 3. Além da avaliação do escoamento sob a perspectiva dos adimensionais associados ao ressalto hidráulico a jusante de vertedouro.

Para concluir, no capítulo 6, na página 146, é realizada uma recapitulação do que foi alcançado frente aos objetivos propostos, resumindo os resultados e sustentações expressas neste trabalho. Na sequência, no capítulo 7, página 151, são inseridas algumas sugestões para trabalhos futuros que venham contribuir ainda mais para o referido tema.

No capítulo 8 são listados os trabalhos consultados e no capítulo 9 são reportados todos os gráficos e figuras provenientes das análises efetuadas nesta tese.

Espera-se que este estudo venha contribuir com o meio técnico, no intuito de fornecer parâmetros que sirvam como orientação na escolha e no dimensionamento de dissipadores de energia por jatos e, mais, na determinação dos esforços hidrodinâmicos extremos no ponto de impacto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ESTRUTURAS HIDRÁULICAS DE DISSIPACÃO

Existem diversos tipos de dissipadores, cada qual com suas peculiaridades e eficiência. Para se obter o melhor custo-benefício da implantação de determinado tipo de dissipador, deve-se atentar para critérios como: topografia, geologia do local, tipo de barramento implantado, além do tipo de arranjo da obra e comparação econômica entre diferentes soluções. Além disso, deve-se levar em conta, também, para a vazão de projeto, curva-chave, nível de jusante, altura de queda, entre outros. Todos estes quesitos devem ser avaliados e considerados visando à implantação de forma mais eficiente e eficaz, de acordo com a facilidade de manutenção e a frequência de operação das estruturas vertedouras. Os riscos de danos e rupturas e a experiência do projetista são aspectos fundamentais e devem ser advertidos. É consenso entre os estudiosos que os modelos físicos reduzidos são ferramentas necessárias para a definição dos critérios abordados.

Dentro disso, essa seção tem como objetivo apresentar os principais tipos de dissipadores e as características de implantação para obter o melhor desempenho de cada estrutura.

3.1.1 Classificação dos dissipadores de energia

Os dissipadores de energia podem ser classificados em dois grupos, conforme sua concepção (PEREIRA, 2015):

- Grupo 1- quando a dissipação da energia ocorre na própria estrutura de concreto. São exemplos: a bacia de dissipação por ressalto hidráulico, *roller bucket*, vertedouros em degraus, entre outros;
- Grupo 2 - quando a dissipação da energia ocorre fora da estrutura, no leito do rio a jusante. Por exemplo: salto esquí, jatos cruzados, jatos em queda livre, sendo os dois últimos, geralmente, utilizados nas barragens em arco em vales estreitos.

Alguns exemplos destes dissipadores podem ser conferidos na Figura 1.

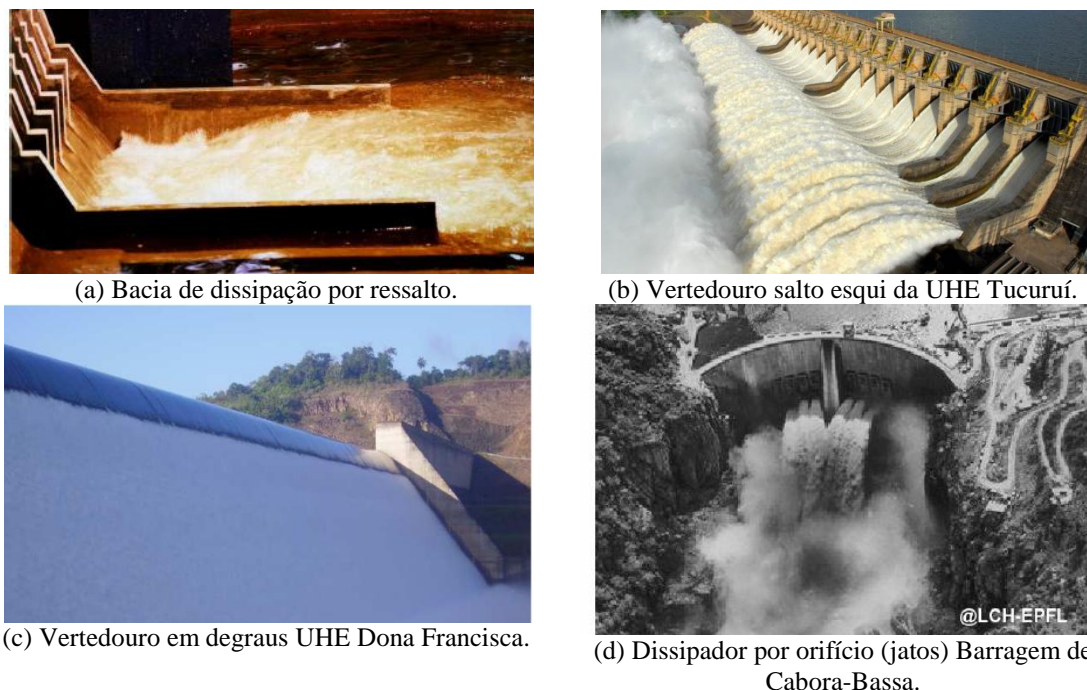


Figura 1 – Exemplos de alguns tipos de dissipadores de energia.

(FONTE: notas de aula do Professor Marcelo Giulian Marques – UFRGS, 2011).

3.1.2 Dissipadores – Grupo 1

Tipo Concha – RollerBucket

Nas bacias de dissipação por ressalto hidráulico ou do tipo concha, conhecidas como *roller bucket*, a dissipação de energia, ou parte dela, ocorre na própria estrutura, portanto, classificada como Grupo 1.

Este tipo de estrutura se caracteriza pela formação de três (3) rolos, sendo o primeiro no interior da concha, o segundo localizado no pé do dissipador (trazendo o material erodido para próximo da estrutura, consequentemente aumentando sua proteção) e, por último, o rolo situado a jusante da zona de impacto do jato. Parte da dissipação ocorre na massa de água situada imediatamente a jusante da estrutura e pelo impacto do escoamento contra o leito, exigindo que o material presente no leito e nas margens possua boa capacidade de resistência à erosão. (CANELLAS *et. al.*, 2016).



Figura 2 – Dissipador de energia tipo *Roller Bucket*.

(FONTE: notas de aula do Professor Marcelo Giulian Marques – UFRGS).

Bacia de dissipação por ressalto hidráulico

Essas estruturas hidráulicas nada mais são do que lajes, planos horizontais, construídas imediatamente a jusante de vertedouros, sobre as quais se forma o ressalto hidráulico e que tem como objetivo proteger o leito natural do rio contra a erosão devido à ação hidrodinâmica do escoamento, preservando, assim, a integridade das fundações da barragem (DAI PRÁ, 2011).

É a forma mais usual de dissipar energia, baseada fundamentalmente na teoria do ressalto hidráulico. Nela há a transição do regime torrencial para o fluvial, sendo um processo extremamente turbulento em larga escala. Apresenta ondas na superfície e realiza a pulverização da água e entrada de ar, dissipando a energia.

Estas estruturas têm uma longa tradição. No entanto, sobretudo para altas quedas e grandes vazões, só a experiência e uma certa “arte” conduzem a bacias econômicas, sendo, em geral, convenientemente utilizado o ensaio em modelo. (LENCASTRE, 1984).

Vertedouro em Degraus

Os vertedouros em degraus têm sido muito utilizados em barragens construídas com concreto compactado a rolo (CCR), principalmente pela facilidade construtiva nestes casos. Esses vertedouros permitem a dissipação da energia ainda na sua calha, por meio da aeração promovida pelos degraus e pelos turbilhões formados com a passagem do escoamento. Assim, a bacia de dissipação a jusante tende a ser menor, resultando em uma grande economia para o empreendedor.

3.1.3 Dissipadores – Grupo 2

Dissipação por Jatos

A dissipação por jatos, do ponto de vista construtivo, é o mais econômico, pois utiliza como dissipador a própria calha natural do rio. Manso et. al. (2009) revela que a formação de uma fossa de erosão, devido à difusão entre água e ar provocada por jatos com altas velocidades e pelo impacto no leito rochoso, é uma solução para a dissipação de energia comumente adotada em muitas barragens. A dissipação por jatos ocorre, basicamente, por meio de três configurações para o lançamento do jato, conforme a Figura 3.

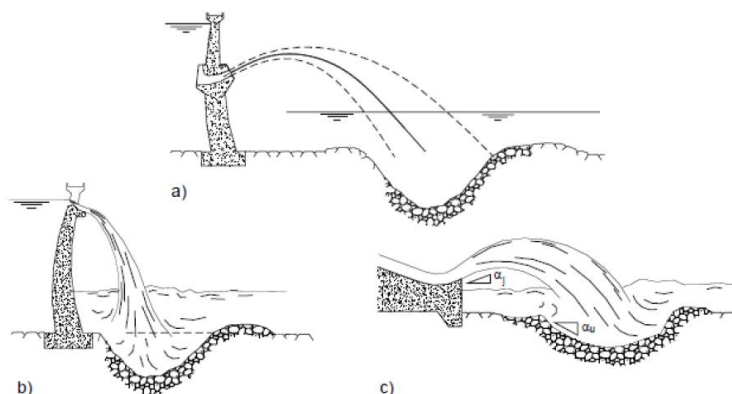


Figura 3 – Tipos de dissipadores por jatos: a) Dissipador por orifício; b) descarregador de superfície; c) salto esqui.

(FONTE: MANSO, 2006)

Estas estruturas lançam o jato praticamente na vertical e relativamente próximo da estrutura. Pinto (1994) aponta que, na maioria dos casos, constrói-se uma laje de concreto e uma estrutura de controle a jusante, com o objetivo de se criar um tanque de amortecimento através do colchão da água criado. Embora menos oneroso, é importante conhecer e estudar a região de impacto do jato, pois este ocorre muito próximo da estrutura. Manso (2006) aponta três soluções, tradicionais, que são consideradas para aumentar a segurança da bacia de dissipação e das estruturas próximas, assim elencadas:

- o aumento da profundidade da bacia de dissipação no leito do rio, aumentando a espessura do colchão da água sobre a bacia;

- diminuição da vazão específica de impacto, ou a construção de estruturas adicionais de vertimento, ou aumento da aeração do jato;
- a pré-escavação do leito do rio, na região de impacto, aumentando assim a profundidade da zona de impacto e induzido a erosão para uma dada direção.

No entanto, o autor explana que a primeira solução pode ser inviabilizada devido aos altos custos envolvidos na obra civil. A segunda solução pode reduzir o alcance do jato ou gerar um espalhamento indesejado do mesmo. E, certamente, a construção de obras civis extras não é a solução mais eficaz em termos de custos. Por outro lado, a terceira alternativa inicialmente pode gerar custos extras, mas o material escavado pode ser utilizado nas demais obras civis.

Dissipador tipo Salto Esqui

No passado, os descarregadores de superfície eram, em geral, formados por uma soleira em cima de uma barragem, seguida por um canal ou túnel e terminando em uma bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico, ou por trampolim submerso (*‘roller bucket’*). Contudo, Lencastre (1984) entende que a evolução destes descarregadores levou à concepção de um novo tipo de dissipador com um trampolim livre na extremidade, o salto de esqui.

Nos saltos de esqui, a energia cinética do escoamento é aproveitada para lançamento do jato à distância, de forma que a dissipação se verifique longe do vertedouro e das demais estruturas do barramento (PEREIRA, 2015). Com isso, é no impacto do jato com o leito do rio que ocorre a maior dissipação de energia.

Em razão do exposto é que se faz necessário o conhecimento dos esforços hidrodinâmicos e a previsão do campo de pressões a que o maciço a jusante fica submetido por meio de uma ação conjunta da hidráulica e da geotecnia, com apoio de modelos reduzidos, visando o bom dimensionamento e a segurança adequada à estrutura. Destaca-se que esta tese desenvolve a análise em torno das pressões longitudinais provocados por jatos dessa natureza.

A Figura 4 apresenta as variáveis envolvidas no estudo dos jatos. Serão estes os símbolos utilizados ao longo do texto.

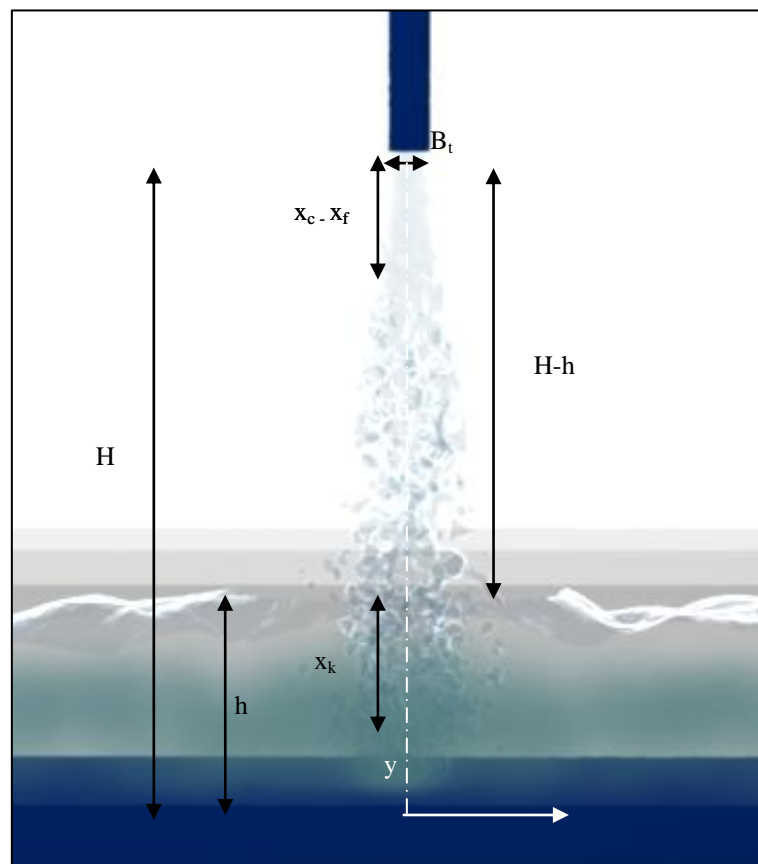


Figura 4 – Variáveis envolvidas no estudo dos jatos.

Onde:

H é a distância vertical entre a saída do bocal e o fundo do canal (m);

h é a espessura do colchão d'água (m);

$(H - h)$ é a altura de queda (m);

x_k é o comprimento do jato submerso (m);

y afastamento horizontal do ponto de impacto (m);

B_t é a espessura do bocal. Para jatos circulares D_0 (m);

x_c é o comprimento do núcleo do jato quando este é submerso (m);

x_f é o comprimento do núcleo do jato livre (atmosfera) (m).

3.2 JATOS

O escoamento do tipo jato livre ocorre quando um fluido é expandido por meio de um bocal ou orifício para um ambiente no qual o escoamento não é diretamente afetado por um contorno fixo.

O jato provoca pressões elevadas no ponto de impacto a partir de suas ações dinâmicas, transmitindo-se à fundação através das superfícies de descontinuidade no maciço rochoso e causando as fossas de erosão.

Carvalho & Nieckele (2008) estudaram o escoamento de um jato incidindo em uma placa plana, Castillo (1989) estudou jatos provenientes de estruturas hidráulicas e, ambos, destacam que o escoamento de um jato envolve três diferentes regiões: a região do jato livre, uma região de deflexão, também chamada de região de estagnação, e uma região chamada região de jato de parede, onde o jato já colidiu com o fundo, Figura 5.

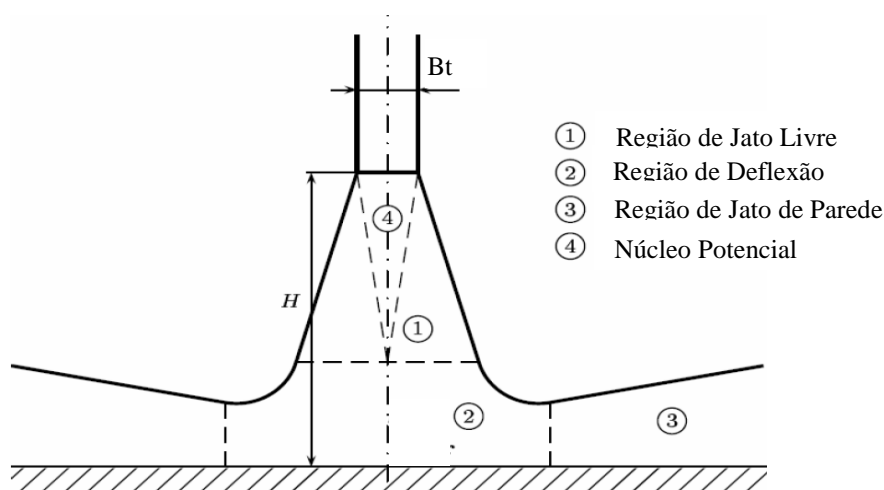


Figura 5 – Esboço do jato incidente.

Fonte: (adaptado de CARVALHO & NIECKELE, 2008)

A região de jato livre caracteriza-se, de acordo com Carvalho e Nieckele (2008), como o escoamento de queda livre, apresentando um alargamento aproximadamente linear. Nessa região, devido à ação de sucção dos turbilhões, formam-se ondulações em cada um dos lados do jato. Esta região apresenta uma grande diferença de velocidade com o núcleo. Na interface, jato livre – núcleo, ocorre uma fina região de cisalhamento que provoca a turbulência no escoamento. Lencastre (1984) define que na entrada do jato

existe, necessariamente, uma grande descontinuidade entre a velocidade do jato, considerada uniforme, e o líquido em repouso. Com isso, os vórtices gerados propagam-se tanto para o exterior como para o interior do jato, resultando no arrastamento do fluido das camadas vizinhas e na diminuição da velocidade do jato. Nesse processo, a tensão superficial vai aumentando devido ao arrastamento de ar, o que ocasiona uma zona de forte turbulência que acaba por atingir a zona central. Esse efeito de frenagem sobre o jato vai se propagando até atingir o seu centro. É neste ponto que ocorre o estabelecimento do escoamento.

A zona de choque ou deflexão é a região em que as linhas de corrente se refletem devido à influência do fundo. Como a velocidade diminui, aparecem pressões e gradientes de pressões relativamente elevados junto ao fundo. A dispersão do jato ao chocar-se com o leito, junto com a mistura de ar arrastado pelo deslocamento na atmosfera, produz turbulência bastante acentuada, dando origem a grandes flutuações de pressão junto ao fundo. A parte principal da lâmina tem características de um jato de parede. À medida que se eleva o nível d'água de jusante, a alteração criada na região de incidência do jato é menor, ocorrendo, assim, o que se assemelha ao ressalto hidráulico.

Manso (2006) explica que existe a formação de um ressalto hidráulico entre a região de jato de parede e a oscilação do nível da água do colchão, o qual foi identificado visualmente durante os seus testes.

Hager (1992) explana que um ressalto hidráulico em um canal com expansão linear pode ser considerado como um “ressalto circular”, produzido pelo lançamento de um jato vertical em uma placa plana, Figura 6.

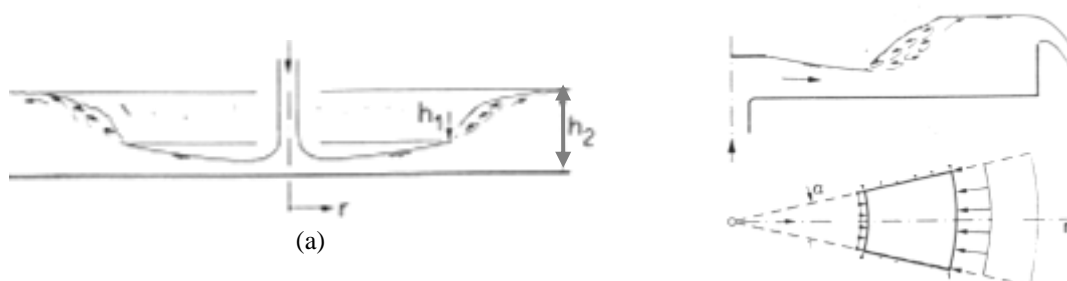


Figura 6 – (a) Ressalto Circular. (b) Ressalto Radial (seção transversal e vista em planta).

(FONTE: adaptado de HAGER, 1992).

O perfil longitudinal do ressalto hidráulico produzido na base de uma queda livre é semelhante ao produzido por um jato horizontal, sendo um pouco mais inclinado em sua zona inicial e cerca de uns 20% mais extenso (LENCASTRE, 1963).

O ressalto hidráulico caracteriza-se por um fenômeno macroscopicamente permanente e bruscamente variado, que se reproduz toda vez que um escoamento a superfície livre passa de um regime crítico ou rápido com número de Froude > 1 , para um regime subcrítico ou lento com número de Froude < 1 , resultando na formação de grandes turbilhões com a incorporação de ar e a dissipação de energia cinética, Figura 7.

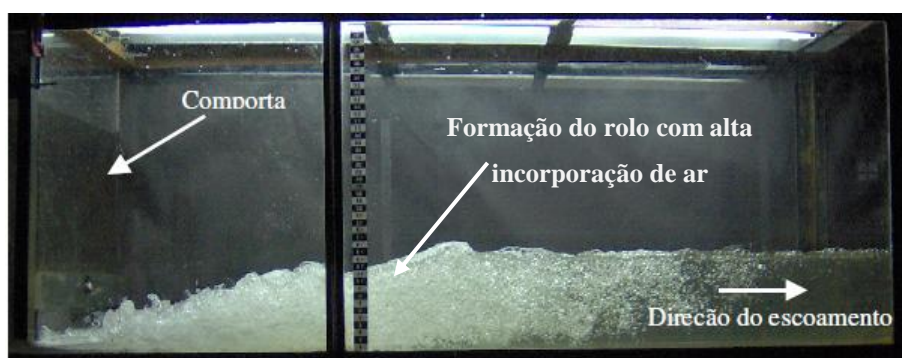


Figura 7 – Formação de ressalto hidráulico a jusante de uma comporta.

(FONTE: adaptado de TRIERWEILER, 2006)

A linha d'água do ressalto apresenta-se de forma bastante instável, com grande oscilação de nível e intensas flutuações de pressão. Tais características representam um papel decisivo no processo de dissipação de energia.

O ressalto hidráulico é, ainda, caracterizado pelas alturas conjugadas, que são as lâminas de água na seção a montante, denominada altura conjugada rápida h_1 , respectiva ao escoamento supercrítico. Na seção mais a jusante, a lâmina de água denomina-se altura conjugada lenta h_2 , respectiva ao escoamento subcrítico.

O conhecimento das alturas conjugadas é bastante importante para a caracterização da forma e do tipo de ressalto. Sendo assim, através da equação da conservação da quantidade de movimento linear, mais considerando simplificações como distribuição hidrostática de pressões, distribuição de velocidades uniforme, seção transversal

retangular, fundo do canal horizontal, escoamento permanente e uniforme (PORTO, 2006) e, considerando, ainda, a água como um líquido invíscuo, pode-se representar a relação entre as alturas conjugadas de acordo com a Equação 1.

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \cdot \left[\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right] \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

h_2 é a altura conjugada lenta (m);

h_1 é a altura conjugada rápida (m);

Fr_1 é o número de Froude na entrada do ressalto, $\frac{V_1}{\sqrt{g \cdot h_1}}$;

V_1 é a velocidade média na seção de escoamento rápido do ressalto (m/s).

No caso da existência de condicionantes que promovam uma elevação da altura conjugada lenta do ressalto hidráulico, h_2 , tem-se o afogamento do ressalto hidráulico. Quando o nível de jusante é maior que a altura conjugada lenta (h_2) do ressalto clássico ocorre, então, o que se chama de ressalto afogado. Este grau de afogamento do ressalto é denominado de submergência (S), razão expressa pela Equação 2. Tal parâmetro é muito importante no caso de ressalto provocado pela incidência de um jato em um colchão d'água.

$$S = \frac{h}{h_2} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

h é a espessura do colchão d'água, ou ainda, o nível de jusante (m);

h_2 é a altura conjugada lenta do ressalto hidráulico (m).

Beltaos e Rajaratnam (1974) chamaram a zona de choque de zona de estagnação e a definem como uma pequena zona de fluxo radial, com raio da ordem de $0,14 \cdot D_0$. Eles propuseram três diferentes condições de choque, baseadas na evolução das pressões de estagnação de acordo com a profundidade da bacia de dissipação (bacias rasas/ condições de transição e bacia profunda).

3.2.1 Dispersão e Aeração

A evolução do jato no ar apresenta 4 passos (COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS¹, 1996):

- emulsão;
- alteração de forma;
- fragmentação
- dispersão.

Na fase de emulsão a gravidade tem pouca influência no jato, pois o mesmo se mantém compacto. O comprimento do trecho de emulsão depende da velocidade, dimensão, geometria e rugosidade da seção de saída. As flutuações turbulentas de velocidade e o aumento da resistência do ar alteram a forma do jato. Na terceira fase, a tensão superficial intervém de forma mais acentuada e a resistência do ar aumenta ainda mais. Na última etapa, a massa compacta de água anterior está dividida e afastando-se, ou seja, jato está completamente desintegrado.

Ervine e Falvey (1987) estudaram o comportamento de jatos livres e em bacias, e propuseram que o escoamento desses jatos, no ar, fosse dividido em cinco fases, a destacar:

- 1º Fase – Jato turbulento não aerado: enquanto não se inicia a aeração do jato, tem-se um lançamento de água com uma intensidade de turbulência que depende do tipo de vertedouro e da forma de aproximação do fluxo em relação a ele. Essa região seria análoga ao núcleo, já abordado.
- 2º Fase – Aeração do Jato: a velocidade relativa entre o jato turbulento e o ar aumenta a turbulência, cria a camada de cisalhamento e os esforços provocados pela turbulência na superfície do jato superam a tensão superficial, provocando a introdução de bolhas de ar no jato. Com uma turbulência inicial baixa, esta 2º fase inicia-se quando o jato alcança uma velocidade da ordem de 6 a 7 m/s.
- 3º Fase – Jato Turbulento Aerado: o jato em queda livre, já aerado, vai ganhando velocidade. O efeito de introdução de ar no jato provoca dissipação de energia do fluxo.
- 4º Fase – Pulverização do Jato: a sucessiva aeração do jato e o aumento da velocidade relativa entre o jato e o ar provoca a dispersão das gotas da água.

¹ Comitê Brasileiro de Grandes Barragens será referenciado como CBGB.

Estas gotas logo serão freadas e alcançarão sua velocidade limite de queda livre no ar. Pode-se afirmar que não afetarão o processo de dissipação. Esse aspecto de não dissipação tem sido objeto de estudo de muitos engenheiros, pois esse fenômeno pode ser nocivo para as UHE²s. O início dessa fase ocorre para velocidades na faixa de 20 e 30 m/s.

- 5º Fase – Jato Pulverizado: se houver uma distância adequada entre o lançamento do jato e o ponto de impacto, pode ocorrer a total dispersão do jato. Os autores caracterizam como uma zona de “chuva”.

Em linhas gerais, a geometria de um jato que cai livremente modifica-se por efeito da aeração e posterior dispersão, diminuindo seu núcleo central. Além disso, Manso (2006) complementa que o comportamento do jato depende, principalmente, da velocidade média do jato, da resistência do ar, da geometria, e do grau de turbulência inicial.

3.2.2 Espalhamento do Jato

O espalhamento lateral do jato, que ocorre devido à turbulência, contração do núcleo e da aceleração gravitacional, é descrito pela Equação 3, segundo Ervine et. al. (1997). Khatsuria (2005) enfatiza que, geralmente, a intensidade de turbulência do jato varia de 0 a 5%.

$$\varepsilon = \frac{1,14 \cdot T_u \cdot V_x^2}{g} \cdot \left[\sqrt{\frac{2 \cdot x}{D_0 \cdot Fr_0^2} + 1} - 1 \right] \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

ε é espalhamento do jato;

T_u é a intensidade de turbulência;

V_x é a velocidade na distância x medida a partir do ponto de lançamento (m/s);

x é a distância medida a partir do lançamento do jato (m);

D_0 diâmetro do jato no lançamento (m);

Fr_0 é o número de Froude no início do lançamento;

V_0 é a velocidade de saída do jato (m/s).

A observação da Figura 8 auxilia no entendimento das variáveis expostas.

² Usinas Hidrelétricas

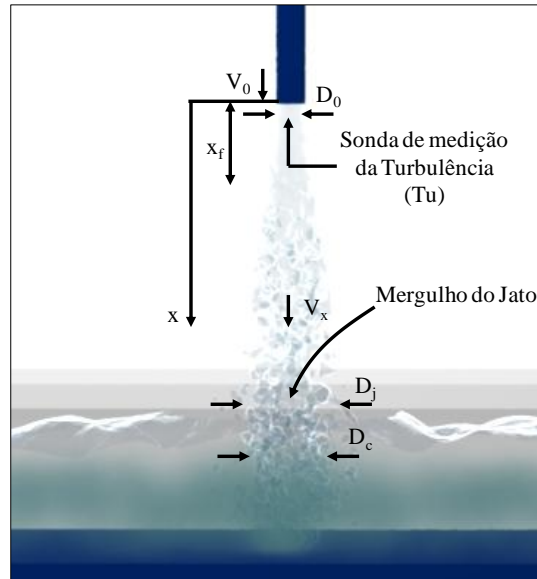


Figura 8 – Localização das variáveis e pontos de medição

O diâmetro médio do núcleo (D_c), em qualquer ponto no mergulho, é dado pela Equação 4:

$$D_c = D_0 \cdot \sqrt[2]{\frac{V_0}{V_x}} \quad \text{Equação 4}$$

O comprimento do núcleo ou comprimento de quebra, durante a queda livre, (x_f) recomendado por Ervine et al. (1997) e Khatsuria (2005), é dado pela Equação 5, válida para jatos circulares.

$$\frac{x_f}{D_0 \cdot Fr_0^2} = \frac{1,05}{C^{0,82}} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

C é o coeficiente de turbulência, calculado por: $C = 1,14 \cdot T_u \cdot Fr_0^2$;

D_0 diâmetro do jato no lançamento (m);

Fr_0 é o número de Froude no início do lançamento;

T_u é a intensidade de turbulência.

Castillo (2006) verificou que jatos circulares são muito mais compactos que os jatos retangulares. Desta forma, o comprimento do núcleo (x_f) pode ser obtido, segundo Horeni³ (1956 apud Ervine et. al. 1997), pela Equação 6.

$$x_f \approx 6 \cdot q^{0,32} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

x_f é comprimento do núcleo ou comprimento de quebra (m);

q é a vazão específica ($\text{m}^3/(\text{s.m})$).

Na Figura 9 são mostrados os dados teóricos, obtidos pelas equações 5 e 6, e os dados experimentais. É possível verificar que existe uma boa relação entre os dados.

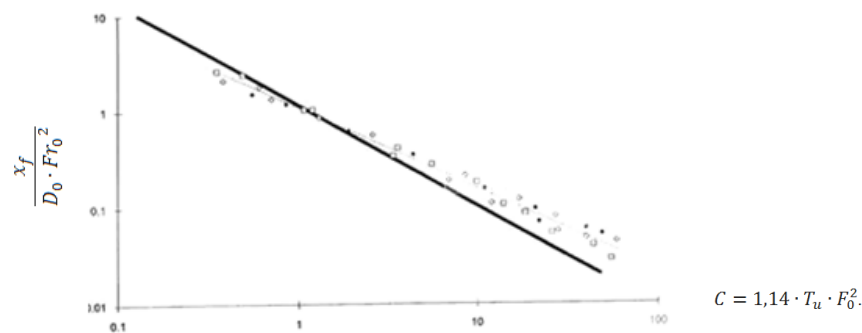


Figura 9 – Dados teóricos e experimentais do comprimento de quebra de um jato circular.

(FONTE: adaptado de ERVINE et. al., 1997)

A entrada de ar segue a função β dada por Equação 7.

$$\beta = 0,26 \cdot \frac{B}{B_p} \cdot \left[\frac{x}{B_t} \right]^{0,466} \cdot \left[1 - \frac{V_m}{V_j} \right] \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

β é a entrada de ar;

V_m é a velocidade mínima ou velocidade crítica para a entrada de ar (m/s);

V_j é a velocidade do jato na entrada do colchão d'água (m/s);

x é a distância medida a partir do lançamento até a superfície da bacia (m);

B é a largura do bocal (m);

³ HORENI, P. Desintegration of a free jet of water in air. Byzkumny ustav vodohospodarsky prace a studie, Sesit p3, Praha, Pokbaba. 1956.

B_t é a espessura do bocal (m);

B_p é o perímetro do bocal (m).

Quando o jato se rompe, ou seja, há a completa desintegração do núcleo, a equação β não leva em conta o ar arrastado entre os aglomerados de água (ERVINE et. al., 1997). Chanson e Brattberg (1998) enfatizam que a quantidade de ar arrastada depende do comprimento do jato e da velocidade de impacto.

De acordo com Ervine (1976), a velocidade crítica para a entrada de ar V_m é mais ou menos constante com o diâmetro do jato, mas varia consideravelmente com o aumento do nível de turbulência do jato. Para uma turbulência da ordem de 3%, o valor de V_m é de aproximadamente 2 m/s. Por outro lado, Ervine e Falvey (1987) se mostram mais conservadores e apontam que a velocidade a partir da qual começa a existir aeração é de 6 m/s, e Castillo (2006) complementa, ainda, que a altura de queda deve ser superior a 1,83 m.

Diante do exposto, Castillo (2006) recomenda, então, a Equação 8 para calcular a espessura do jato (B_j) no momento do impacto com o colchão d'água.

$$B_j = \frac{q}{\sqrt[2]{2 \cdot g \cdot (H - h)}} + 4 \cdot \Omega \cdot \sqrt[2]{h_L} \cdot [\sqrt[2]{(H - h)} - \sqrt[2]{h_L}] \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

q é a vazão específica ($\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$);

H é a distância vertical entre o ponto de lançamento até o fundo do canal (m);

h é a espessura do colchão d'água (m);

Ω é o parâmetro que define a turbulência, sendo $\Omega = r \cdot (v'/V_0)$. O autor afirma que os valores de r encontram-se entre 0,44 e 0,95, porém para jatos retangulares ou escoamentos em queda sucessivas os valores prováveis estão entre 0,6 e 0,85.

O coeficiente r é calculado a partir da Equação 9.

$$r = \frac{6 \cdot q^{0,32}}{B \cdot Fr_0^2} \cdot (1,14 \cdot Tu \cdot Fr_0^2)^{0,82} \quad \text{Equação 9}$$

h_L lâmina de água sobre a crista vertedoura (m);

v' componente turbulenta na direção do escoamento (m/s);

V_0 velocidade inicial do jato (m/s);

Fr_0 é o número de Froude no lançamento do jato;

B é a largura do jato no ponto de lançamento, ou no bocal (m);

Tu é a intensidade de turbulência.

Na Figura 10 pode ser conferida a comparação entre a espessura do jato, no impacto, calculada e medida. É possível identificar que o valor de $r = 0,84$ apresenta os melhores resultados.

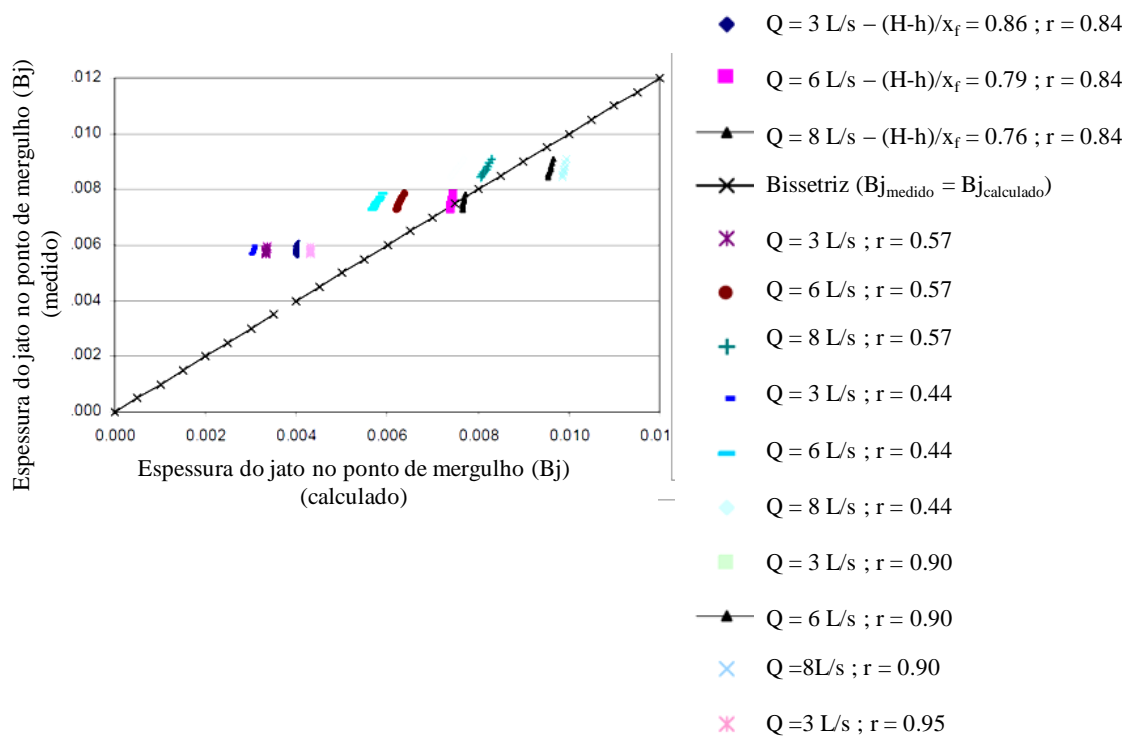


Figura 10 – Comparação entre a espessura do jato no impacto (B_j) medida e calculada.

(FONTE: adaptado de CASTILLO, 2006)

3.2.3 Entrada no Colchão da água

Borja (2012) esclarece que a entrada de ar no impacto do jato com o colchão, de acordo com Chanson (1997⁴ apud Chanson, Aoki & Hoque, 2002), pode ocorrer de três maneiras:

1. Se o jato incidente contém ar em seu interior devido à quebra da tensão superficial, o ar aprisionado é dirigido para o fundo do colchão.

⁴ CHANSON, H. Air Bubble Entrainment in Free-Surface Turbulent Shear Flows. **Academic Press**, 1997, 348 pages.

De acordo com Van de Sande e Smith⁵ (1973 apud CHANSON, 1995), esse mecanismo de entrada de ar ocorre predominantemente em jatos com altas velocidades, próximas às de protótipo.

2. A entrada de ar pode ser ocasionada pela camada cisalhante exterior do jato, a qual arrasta uma parcela de ar para dentro do colchão.
3. Ou pode ocorrer, ainda, pela aspiração de pacotes de ar que são formados devido à indução de uma tromba de ar entre o colchão e o fluxo do jato que mergulha dentro do mesmo. Esta estrutura eventualmente é rompida, formando os pacotes de ar, os quais se rompem em seguida em bolhas menores que são carregadas para o fundo.

De acordo com Van de Sande e Smith (1973 apud CHANSON, 1995), o último mecanismo abordado predomina em jatos com velocidades baixas, menores que 5 m/s.

Albertson⁶ et al. (1948 apud MANSO, 2006) observaram a existência de duas zonas de difusão: a zona de desenvolvimento e a zona de estabilização. A diferença entre as zonas está na distância do lançamento e do grau de mistura ar-água. Nessa linha, os autores propõe que o ângulo de difusão do jato (α) deve ser constante e que a espessura da camada de mistura (C) pode ser relacionada com a distância x, por meio de $b_{J-A}/x = C$, Figura 11, onde C é a constante de turbulência, Equação 10:

$$C = \tan(\alpha_1) + \tan(\alpha_2) \quad \text{Equação 10}$$

Manso (2006) cita que os valores de C variam de 0,10 para jatos de igual densidade a 0,20 para jatos com corrente, ou ainda 0,06 para jatos com contra-fluxo, de acordo com a Teoria de Abramovich⁷ (1963).

⁵ VAN DE SANDE, E.; SMITH, J. M. Surface Entrainment of Air by High Velocity Water Jets. **Chem. Eng. Science**, 1973, Vol. 28, pp. 1161-1168.

⁶ ALBERSTON, M. et al. Diffusion of submerged jets. **Transactions of The ASCE**. Paper n. 2409. p. 639-664. 1948.

⁷ ABRAMOVICH, G. N. **The theory of turbulent jets**. M.I.T. Press. 1963.

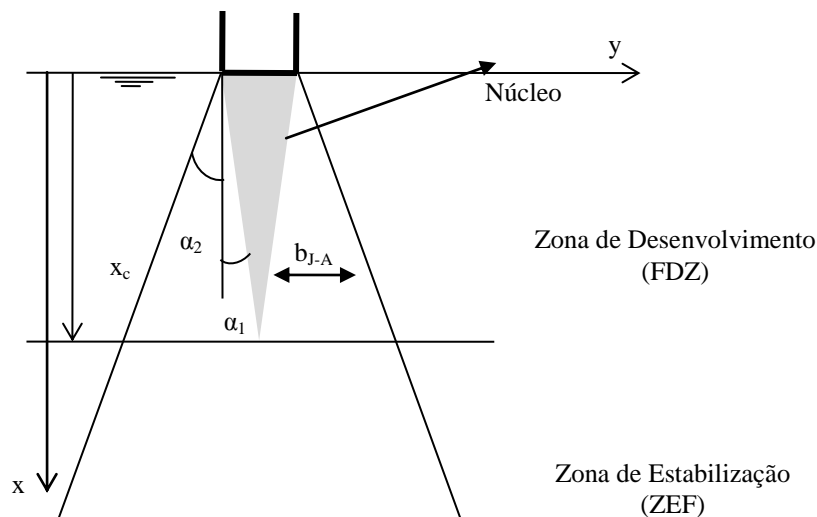


Figura 11 – Difusão do jato, onde α_1 é o ângulo de contração do núcleo, α_2 é o ângulo da camada cisalhante e x_c é o comprimento de desenvolvimento do núcleo.

O coeficiente de difusão (C_d) pode ser definido pela Equação 11. Manso (2006) escreve que, no caso de jatos submersos, o coeficiente de difusão apresenta valores entre 5 e 6,2.

$$C_d = \frac{1}{\sqrt[2]{\pi} \cdot C} \text{ ou } C_d = \frac{x_c}{D_0} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

x_c é o comprimento de desenvolvimento do núcleo submerso (m);

D_0 é o diâmetro inicial do jato ou largura do jato (B), no caso de jatos retangulares (m).

O ângulo de contração do núcleo (α_1) é definido pela Equação 12 e o ângulo de difusão exterior (α_2) do jato é definido pela Equação 13 (MANSO, 2006):

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{1}{2 \cdot C_d}\right) \quad \text{Equação 12}$$

$$\alpha_2 = \arctan C - \alpha_1 \quad \text{Equação 13}$$

O comprimento do núcleo do jato, segundo Khatsuria (2005), ocorre para 5 vezes a largura do jato ou 5 vezes o diâmetro do jato na entrada da bacia. Hartung & Häusler (1973) propõem para o cálculo do comprimento do núcleo (x_c) a Equação 14.

$$x_c = \frac{\frac{B_j}{2}}{\tan(\alpha)} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

B_j é a largura do jato na entrada do colchão de água (m);

$\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2)$ é ângulo de difusão do jato no colchão de água.

Os autores admitem que $\tan(\alpha)$ é, aproximadamente, igual a 0,10, tanto para jatos circulares como para jatos retangulares. Sendo assim, concluem que o comprimento do núcleo do jato é igual a 5 vezes a largura do jato.

Castillo (2002), um pouco mais arrojado, explica que, pelo processo de difusão, o núcleo é completamente desintegrado a uma profundidade de 4 vezes a espessura do jato no momento do impacto.

Um jato retangular ainda retém cerca de 80% da energia inicial, enquanto que um jato circular retém cerca de 70% da energia inicial quando $x = x_c$ (KHATSURIA, 2005).

Pinto (1994) aponta que quando um jato adentra um colchão da água em repouso ele se dispersa de forma linear. Dentro do jato, os contornos do núcleo são lineares e caracterizam-se pelo fato de se ter a mesma velocidade que na seção de impacto e, portanto, com pressão hidrostática agindo ao longo deste mesmo contorno.

McKeogh and Ervine⁸ (1981 apud MANSO, 2006) apontam que, para jatos circulares submersos, o ângulo de espalhamento, ângulo de difusão exterior α_2 , apresenta valores em torno de 13° - 14° na zona de desenvolvimento, e 14°-15° na zona de estabilização.

Ervin e Falvey (1987), ao estudar jatos turbulentos submersos, identificaram e mediram os ângulos por meio de fotografias do escoamento e, desta forma, propõem os ângulos expressos na Figura 12.

⁸ McKEOGH, E. J. and ERVINE, D. A. **Air entrainment rate diffusion pattern of plunging liquid jets.** Chemical Engineering Science 36. 1161-1172.

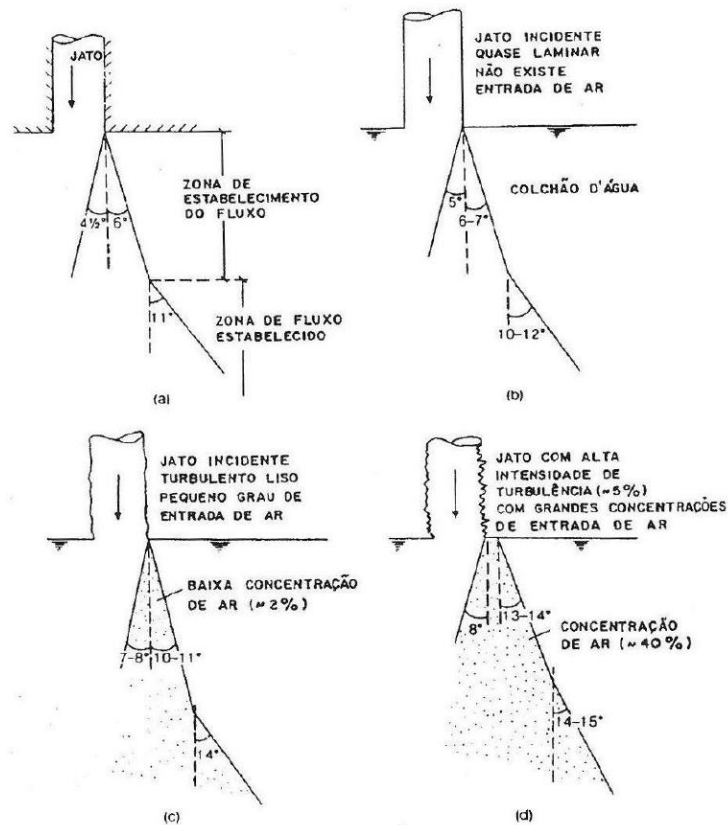


Figura 12 – Difusão de um jato no colchão ilimitado. (a) jato submerso; (b) jato quase laminar; (c) jato turbulento liso; e (d) jato altamente turbulento.

(FONTE: adaptado de ERVINE e FALVEY, 1987)

Pinto (1994) escreve que a profundidade para o qual o jato não tem mais velocidade na direção principal do fluxo e, portanto, não ocorrem mais pressões dinâmicas, denomina-se comprimento do jato submerso (x_k). Hartung & Häusler (1973) identificaram que o comprimento do jato submerso, em jatos circulares, pode ser calculado pela Equação 15.

$$x_k \cong 20 \cdot (2 \cdot R_0) = 4 \cdot 5 \cdot (2 \cdot R_0) = 4 \cdot x_c \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

R_0 é o raio do jato (m);

x_c é o comprimento de desenvolvimento do núcleo (m).

Para jatos retangulares, Cola (1965) definiu a Equação 16.

$$x_k \cong 40 \cdot \left(2 \cdot \frac{B_j}{2}\right) = 8 \cdot 5 \cdot \left(2 \cdot \frac{B_j}{2}\right) = 8 \cdot x_c \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

x_c é o comprimento de desenvolvimento do núcleo (m);

B_j é a largura do jato na entrada do colchão (m).

Ervine et al (1997) são menos conservadores e afirmam que o núcleo do jato na água desaparece por cisalhamento a uma profundidade de cerca de 4 a 6 vezes a menor dimensão do jato (diâmetro ou espessura), a contar da superfície do colchão da água.

Martins e Viseu (1994) afirmam que a espessura mínima do colchão d'água deve ser $14 \cdot B_t$ ou alternativamente $1,5 \cdot h_{cr}$, sendo h_{cr} a profundidade crítica.

Manso (2006) aponta que a velocidade no núcleo do jato pode ser considerada como a velocidade dada pela altura de queda e, em termos práticos, pode ser assumida como a velocidade de entrada na bacia, Equação 17.

$$V_H = \sqrt{V_0^2 + 2 \cdot g \cdot (H - h)} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

V_0 é a velocidade no lançamento do jato (m/s);

g é a aceleração gravitacional (m/s²);

H é a distância vertical entre a saída do jato até o fundo do canal (m);

h é a espessura do colchão d'água (m).

Na zona de desenvolvimento (FDZ), onde o núcleo persiste, a velocidade do jato cai de acordo com a lei proposta pela Equação 18:

$$\frac{V_{max,x}}{V_0} = C_v \cdot \frac{D_0}{h_f} \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

$V_{max,x}$ é a velocidade na linha central na distancia x (m/s);

V_0 é a velocidade inicial, e pode ser substituída pela velocidade na entrada da bacia (V_j) (m/s);

D_0 é o diâmetro do jato no momento do lançamento (m);

C_v é o coeficiente que depende das condições de difusão. Manso (2006) escreve que valores da ordem de 5,8 a 7,4 foram reportados na literatura. Pode ser substituído pelo coeficiente de difusão C_d . C_v é 6,2 para jatos submersos (ALBERSTON⁹ et al., 1948 apud MANSO, 2006) e 4 para jatos turbulento rugosos (ERVINE e FALVEY, 1987).

h_f , para jatos mergulhantes, é medido do fundo da fossa até a superfície.

De acordo com Manso (2006), a Equação 18 pode ser interpretada como a taxa de decaimento da velocidade na zona de desenvolvimento. Quanto mais baixo C_v mais rápido a velocidade decai.

Para jatos mergulhantes lisos e rugosos, McKeogh and Ervine¹⁰ (1981 apud MANSO, 2006) propõe a Equação 19:

$$\frac{V_{max,x}}{V_0} = 3,3 \cdot \left(\frac{D_0}{x}\right)^{1,1} \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

D_0 é o diâmetro do jato no momento do lançamento (m);

V_0 é a velocidade inicial (m/s);

$V_{max,x}$ é a velocidade na linha central na distância x (m/s);

x distância medida a partir da origem do lançamento do jato (m).

Boher et al. (1998) executou testes com jatos desenvolvidos e não desenvolvidos na entrada da bacia. Foram realizados 20 ensaios com jatos não desenvolvidos, com velocidades variando de 0,48 a 3,01 m/s, com a entrada de ar medida entre 0,38% e 0,52%. A equação proposta, para o decaimento da velocidade na linha central, é expressa pela Equação 20.

$$\frac{V_{max,x}}{V_j} = 0,0675 \cdot \frac{\rho_j}{\rho_w} \cdot \frac{V_j^2}{g \cdot x} + 0,1903 \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

$V_{max,x}$ é a velocidade na linha central na distância x (m/s);

V_j é a velocidade na entrada da bacia (m/s);

⁹ ALBERSTON, M. et al. Diffusion of submerged jets. **Transactions of The ASCE**. Paper n. 2409. p. 639-664. 1948.

¹⁰ McKEOGH, E. J. and ERVINE, D. A. **Air entrainment rate diffusion pattern of plunging liquid jets**. Chemical Engineering Science 36. 1161-1172.

ρ_j é a massa específica do jato na entrada da bacia (kg/m^3);

ρ_w é a massa específica da água (kg/m^3);

x é a distância percorrida medida a partir do ponto de lançamento (m);

g é a aceleração gravitacional (m/s^2).

Destaca-se que a Equação 20 é válida para $0,51 < \frac{\rho_j}{\rho_w} \cdot \frac{V_j^2}{g \cdot x} < 5,76$.

Manso (2006) conclui, ainda, que o perfil de velocidades na zona de fluxo estabilizada é similar à função Normal (Gaussiana) e, de acordo com Holdhusen¹¹ (1948), esses perfis desaparecem para $y/x = 0,25$, no caso de jatos circulares.

3.2.4 Largura de Influência

Na tentativa de identificar a zona de impacto, Beltaos (1976), por meio de 10 experimentos em modelo de escala reduzida, variando ângulos de impacto do jato (20° , 30° , 40° , 45° e 60°) e número de Reynolds entre 8550 a 12000, propôs que, para os perfis de pressão que não exibem valores negativos, a zona de impacto (b) é definida pela distância do ponto de estagnação ($y = 0,0$), na qual o valor da pressão dinâmica (P_d) atinge a metade do valor da pressão máxima ($P_{dm\acute{a}x}$), ou seja, $P = 0,5P_{dm\acute{a}x}$, Equação 21. Na situação em que os perfis de pressão apresentam valores de pressão menores que zero ($P < 0$), o autor propõe que (b) seja a distância y em que é satisfeita a igualdade $(P - P_{dm\acute{m}n}) = 0,5(P_{dm\acute{a}x} - P_{dm\acute{m}n})$, Equação 22.

$$\frac{P_d}{P_{dm\acute{a}x}} = 0,5 \quad \text{Equação 21}$$

$$\frac{P_d - P_{dm\acute{m}n}}{P_{dm\acute{a}x} - P_{dm\acute{m}n}} = 0,5 \quad \text{Equação 22}$$

Na Figura 13, Beltaos (1976) reúne os dados de Schauer e Eustis¹² (1963), Kamoi e Tanaka¹³ (1972) e Beltaos e Rajaratnam (1974) mostrando a faixa de influência relativa,

¹¹ HOLDHUSEN, J. S. Discussion of Diffusion of submerged jets by Alberston et. al. **Transactions of The Asce**. Paper n. 2409, p. 665-671. 1948.

¹² SHAUER, J. J., EUSTIS, R. H., The flow development and heat transfer characteristics of plane turbulent impinging jets. **TECHN.DEPT.MECH.ENG.** University Stanford., Oct. 1963.

$b/(H-h)$, do jato junto à soleira. Os dados de Schauer e Eustis¹⁴ (1963) foram obtidos para $(H-h)/D = 20, 30$ e 40 , enquanto que os dados de Kamoi e Tanaka (1972) representam os casos $(H-h)/D = 12$ e 16 . Na faixa de valores de $\phi \leq 120^\circ$, $b/(H-h)$ varia pouco, no entanto encontra-se para valores de $\phi \leq 20^\circ$ um comportamento inesperado, em que b tende a tornar-se indefinido (BELTAOS, 1976).

Destaca-se que:

- b é a faixa de influência do jato no fundo da soleira (m);
- H é a distância vertical entre a saída do jato até o fundo do canal (m)
- h é a espessura do colchão d'água (m);
- ϕ é o ângulo entre o jato incidente e a soleira.

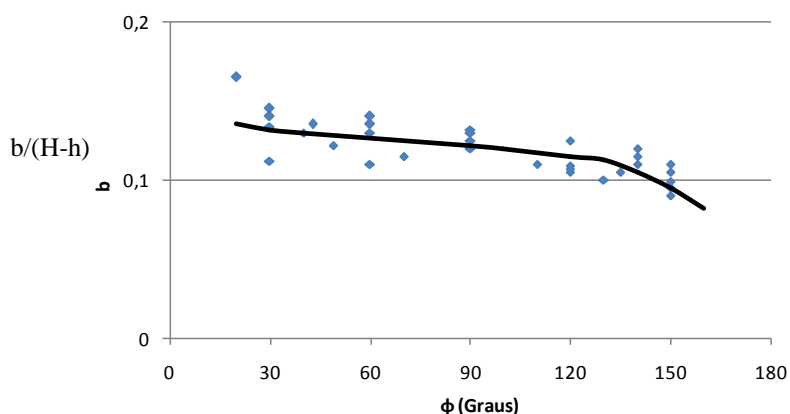


Figura 13 – faixa de influência da pressão junto da soleira.

(FONTE: adaptado de BELTAOS, 1976).

¹³KAMOI, A., TANAKA, H. Measurement of wall shear stress, wall pressure and fluctuations in the stagnation region produced by oblique jet impingement. **Fluid Dynamic Measurements**. Conference Papers. Leicester: University Press, 1972. v.1. p. 217 – 227.

¹⁴ SHAUER, J. J., EUSTIS, R. H., The flow development and heat transfer characteristics of plane turbulent impinging jets. **TECHN.DEPT.MECH.ENG.** University Stanford., Oct. 1963.

3.3 DISSIPACÃO DE ENERGIA

O entendimento dos processos de dissipação de energia se mostra importante no que tange à proteção das lajes de bacias de dissipação ou, ainda, para estimar a evolução das erosões na soleira. Dessa forma, compreender os mecanismos turbulentos é indispensável para o estudo da dissipação de energia e, sobretudo, para o estudo dos esforços turbulentos que se exercem nos contornos sólidos com o escoamento.

3.3.1 Turbulência como fator fundamental da dissipação de energia

A turbulência não é uma propriedade do fluido, mas uma propriedade associada ao escoamento. Osborne Reynolds identificou diferentes escoamentos quando injetou corante no interior de um duto circular, pelo qual passava água. Ele identificou que à medida que a velocidade do escoamento aumentava, surgiam instabilidades na forma de ondulações no escoamento, o que provocava a mistura completa do corante com a água. O movimento que causa essa mistura é chamado de turbulência e está associado à passagem de turbilhões ou vórtices, que aparecem devido a viscosidade do fluido.

De acordo com Pinto (1994), o que define a turbulência é a existência de determinadas condições impostas pela interação e ruptura de turbilhões de várias dimensões, entre os quais existe um determinado mecanismo de transferência de energia, dando origem às intensas ações de mistura. Essa transferência de energia ocorre de acordo com a Teoria de Kolmogorov, isto é, pela transferência de energia dos grandes vórtices (que correspondem a baixas frequências) para os vórtices com tamanhos cada vez menores, os quais estão associados às altas frequências. À medida que ocorre o decaimento de energia, Tennekes e Lumley (1972) apontam que os vórtices vão ficando cada vez menores, até que a dissipação esteja ligada apenas às forças viscosas. Essa região denomina-se região do equilíbrio universal.

A turbulência manifesta-se pelo estado irregular do escoamento, no qual as várias quantidades mostram uma variação aleatória no espaço e no tempo, mas de tal modo que é possível estabelecer estatisticamente valores médios, isto é, em um dado ponto do escoamento turbulento, o esquema do movimento das partículas repete-se com certa regularidade no tempo e, em um dado instante, uma determinada forma de escoamento repete-se com certa regularidade no espaço (LENCASTRE, 1984).

Dentro deste contexto, Pinto (1994) expõe cinco (5) características fundamentais do escoamento turbulento, sendo elas:

4. Caráter aleatório – flutuações aleatórias tanto temporais como espaciais, porém, não exclui os escoamentos com flutuações periódicas e aleatórias sobrepostas.

Hinze (1975) definiu a turbulência como sendo uma condição irregular do movimento, onde os tamanhos das diferentes grandezas em jogo apresentam uma variação abrupta no espaço e no tempo. Tennekes e Lumley (1972) apontam que uma análise determinística é impossível, sendo possível, apenas, através de métodos estatísticos.

Admite-se, então, que a turbulência é um processo aleatório estacionário, ou ainda um processo quase estacionário.

5. Caráter rotacional

A presença dos turbilhões de diferentes tamanhos garante um movimento tridimensional e rotacional, já que a presença das tensões de cisalhamento são responsáveis por esta vorticidade. (FOX & MCDONALD, 1998)

6. Caráter não linear – interação entre os vórtices maiores com os vórtices menores produzindo uma transferência de energia dos maiores para os menores.

A turbulência dos grandes turbilhões ou vórtices é chamada de macroturbulência. A microturbulência é caracterizada pelos pequenos turbilhões, que estão associados às altas frequências de flutuação e atrelados às forças viscosas.

7. Caráter difusivo – alto poder de mistura;

Da mesma forma que o escoamento misturou o corante no experimento de Reynolds, Tennekes e Lumley (1972) relatam a difusão do movimento médio do escoamento, calor, quantidade de movimento e energia cinética.

8. Caráter dissipativo – transformação da energia cinética em calor por meio da ação da viscosidade.

Escoamentos turbulentos são sempre dissipativos e a viscosidade transforma o movimento dos pequenos vórtices em calor (TENNEKES & LUMLEY, 1972).

Em resumo, a turbulência permite a perda de carga por meio da transferência da energia cinética do escoamento para os grandes turbilhões. A interação destes turbilhões faz a transferência da energia para os turbilhões menores, em um efeito cascata, até que os turbilhões sejam suficientemente pequenos para, por atrito viscoso, dissipar em calor a energia cinética que lhes foi transferida.

3.3.2 Intensidade de turbulência

Manso (2006) enfatiza que conhecer a intensidade de turbulência inicial é parâmetro fundamental na análise de deformação de um jato no ar.

Castillo (1989) define que o desvio padrão da amostra de pressões instantâneas representa a flutuação quadrática média (variância no caso de processos aleatórios estacionários) de acordo com a Equação 23.

$$\sigma = \sqrt[2]{P'^2} \quad \text{Equação 23}$$

Onde

P' é a flutuação de pressão (m);

V é a velocidade média do jato (m/s);

σ é o desvio padrão da amostra de pressão (m).

A intensidade de turbulência define a taxa de aumento dos limites exteriores do jato (interferindo em α_2) e a taxa de contração do núcleo (interferindo em α_1), respectivamente, para fora e para dentro, no desenvolvimento de perturbações superficiais.

Manso (2006) afirma que quanto maior for a intensidade da turbulência no momento do impacto, mais curto será o comprimento de desenvolvimento do jato. Se o núcleo

dissipa totalmente até o momento do impacto, existe a interação de duas fases (água-ar), totalmente turbulentas, que originam uma camada de cisalhamento na parte inferior da bacia, gerando flutuações de pressão significativas. No caso oposto, quando o núcleo permanece até o momento do impacto, as pressões oriundas são altas, contudo são praticamente uniformes na parte inferior da bacia. Conclui, Lencastre (1984), que a flutuação de pressão propicia o aparecimento da cavitação e de vibrações.

Dentre tantas dificuldades, aquela enfrentada pelos engenheiros no momento da definição da intensidade de turbulência é a ausência de informação, em protótipo, da turbulência inicial de um jato. Sendo assim, acaba-se por assumir que o perfil de velocidades no lançamento do jato é uniforme.

Por outro lado, assumindo um perfil turbulento totalmente desenvolvido em vez de um uniforme, verifica-se um aumento de 10 a 20% da energia de impacto máximo que pode ser transferido para a massa de rocha. Esta última hipótese parece realista em condições de protótipo e aumenta, substancialmente, o potencial de erosão do jato durante as fases iniciais, em comparação com o antigo pressuposto (MANSO, 2006).

3.4 ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS

Somente 20% a 30% da energia incidente do jato é dissipada ao longo do núcleo do jato, portanto, 70% a 80% da energia incidente impactará no leito ou na bacia a jusante. Sendo assim, as ações dinâmicas de um jato numa estrutura só podem ser bem analisadas se forem estudados os esforços hidrodinâmicos através de boa descrição do fenômeno, quer no domínio do tempo e do espaço, quer no domínio de frequência.

3.4.1 Pressão média e pressão dinâmica junto ao fundo

A pressão média P_m é a resultante da pressão "hidrostática" proveniente do colchão da água (h) e possui valor igual à espessura do mesmo, mais uma parcela de pressão que, somadas, traduzem a ação do jato sobre o fundo do canal.

A pressão dinâmica representa a diferença entre a pressão de estagnação do escoamento, em um dado ponto de uma linha de corrente onde a velocidade seja nula, e a pressão hidrostática em outro ponto da mesma linha de corrente, para jatos verticais. Como não há componente da quantidade de movimento da direção do escoamento, Pinto (1994) explica que a espessura do colchão d'água (h) representa a carga hidrostática que atua no fundo. Assim, a pressão dinâmica (Pd) é expressa pela Equação 24.

$$P_d = P - h \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

P é a pressão medida (m);

h é a espessura do colchão d'água, (m).

O conhecimento das pressões dinâmicas no ponto de estagnação e em sua vizinhança é importante para o dimensionamento de lajes (soleiras de fundo) e, também, na estimativa da fossa de erosão. Portanto, tem sido objeto de estudos de diversos pesquisadores, tais como de Cola (1965), Aki¹⁵ (1969), Beltaos (1976) e Hartung e Hausler (1973), com o objetivo de desenvolver uma metodologia para prever as pressões atuantes no fundo da soleira.

¹⁵ AKI, S. Estudio de la eficiencia de los colchones de agua em relación a los chorros libres. J. **Inst. Investigación de las Cetrals Hidroeléctricas**, 1969.

3.4.2 Metodologias para previsão de pressões dinâmicas no impacto do jato

A distribuição de pressões na soleira, segundo Manso (2006), não obedece a distribuição normal, visto que o jato não atinge a soleira perpendicularmente. No entanto, diversos autores propõem uma distribuição simétrica exponencial de acordo com a Equação 25. Hartung e Hausler (1973) sugerem, para identificar a pressão em determinado ponto da soleira, a combinação entre a Equação 25 e a Equação 26.

$$P_{y/h} = P_{dmáx} \cdot e^{-\varphi} \quad \text{Equação 25}$$

$$\varphi = \frac{\pi}{16} \cdot \left(2 \cdot \frac{x_c}{B_j} \cdot \frac{y}{h} \right)^2 \quad \text{Equação 26}$$

Onde

$P_{y/h}$ é a pressão dinâmica média na posição y/h (m);

$P_{dmáx}$ é a pressão dinâmica máxima (m);

y/h é a posição adimensional em relação ao ponto de estagnação;

h é a espessura do colchão de água (m);

B_j diâmetro do jato na entrada do colchão da água (m);

x_c é o comprimento do núcleo (m).

Os autores definem como φ o comportamento dado pela Equação 27, para a situação em que $x_c = 5 \cdot B_j$.

$$\varphi = -19,6 \cdot \left(\frac{y}{h} \right)^2 \quad \text{Equação 27}$$

Por outro lado, se a profundidade é maior, $x_c = 7,2 \cdot B_j$, o valor proposto para φ segue como o exposto pela Equação 28.

$$\varphi = -40,71 \cdot \left(\frac{y}{h} \right)^2 \quad \text{Equação 28}$$

Beltaos (1976) propõe a combinação entre a Equação 25 e a Equação 29, baseado em estudos realizados com jatos de ar, em condições cujo fluxo é incompressível, e as

análises das pressões dinâmicas médias com jato desenvolvido. A expressão é válida para ângulos de incidência de 20° a 90°.

$$\varphi = -42,01 \cdot \left(\frac{y}{h}\right)^2 \quad \text{Equação 29}$$

Cola (1965) estudou a dissipação de energia de um jato vertical submerso incidindo em uma bacia e sugeriu a combinação entre a Equação 25 e a Equação 30.

$$\varphi = -40,51 \cdot \left(\frac{y}{h}\right)^2 \quad \text{Equação 30}$$

Há várias limitações nestas equações. Uma delas, por exemplo, é não ser considerada a perda de carga devido à entrada de ar e o seu consequente emulscionamento na zona de impacto.

Aki¹⁶ (1969 apud CASTILLO, 1989) sugere a combinação entre a Equação 25 e a Equação 31. Pinto (1994) aponta que este ajuste difere dos demais (em termos numéricos) No entanto, é difícil avaliar o motivo, pois se desconhece as dimensões reais dos ensaios e a magnitude dos efeitos da tensão superficial nos ensaios do pesquisador.

É importante destacar que a Equação 31 é válida somente para o intervalo $[h_2, 5B_j]$, sendo h_2 o valor do limite inferior $5B_j$ o valor do limite superior.

$$\varphi = -12,56 \cdot \left(\frac{y}{h}\right)^2 \quad \text{Equação 31}$$

Puertas (1994) avaliou os aspectos quantitativos do comportamento de uma bacia de amortecimento usando como variável a pressão registrada na soleira. Os ensaios foram conduzidos em um modelo reduzido de uma soleira a jusante de um vertedouro de superfície livre. Como resultado, o autor propõe a combinação da Equação 25 com a Equação 32.

¹⁶ AKI, S. Estudio de la eficiencia de los colchones de agua em relación a los chorros libres. J. **Inst. Investigación de las Cetrals Hidroeléctricas**, 1969.

$$\varphi = -42 \cdot \left(\frac{y}{h}\right)^2 \quad \text{Equação 32}$$

Castillo (1989) definiu uma metodologia para o estudo do campo de pressões para o caso de jatos em queda livre em barragens tipo abóboda em uma bacia de fundo plano. Para isto, propõe a unificação das expressões de Cola (1965), Aki (1969), Beltaos (1976) e Hartung e Hausler (1973), Equação 33 ou Equação 34. A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros das equações de previsão de cálculo das pressões dinâmicas médias nas proximidades do ponto de estagnação.

$$\frac{P_d}{P_{dmáx}} = e^{-\varphi \left(\frac{x}{b}\right)^2} \quad \text{Equação 33}$$

Ou ainda

$$\frac{P_d}{P_{dmáx}} = e^{-\varphi \left(\frac{x}{h}\right)^2} \quad \text{Equação 34}$$

Onde:

b é a largura de influência do jato (m);

h é a profundidade do colchão de água (m);

x é medida longitudinal ao jato medida a partir do lançamento (m).

Tabela 1 - Parâmetro das equações de previsão de cálculo das pressões dinâmicas médias nas proximidades do ponto de estagnação.

Autor	φ	b/h	x_c
Cola (1965)	40,51	0,13 ⁽¹⁾	-
Aki (1969)	12,56	0,13	-
	12,56	0,23 ⁽³⁾	-
Beltaos (1976)	42,01	0,13	-
Hartung and Hausler (1973)	19,60*	0,13 ⁽¹⁾	5B ⁽²⁾
	40,71**	0,13 ⁽¹⁾	7,2B ⁽⁴⁾

*Situação em que o núcleo do jato está desintegrado.

**Presença do núcleo do jato.

(1) valor obtido por Beltaos (1976)

(2) valor obtido por Hartung E Hausler (1973)

(3) valor obtido por Xu Duo-Ming (1986)

(4) valor proposto por Castillo (1989)

(FONTE: adaptado de CASTILLO, 1989)

Na Figura 14, apresentam-se as curvas resultantes das expressões propostas pelos autores citados, além dos dados de ensaios de Castillo (1989).

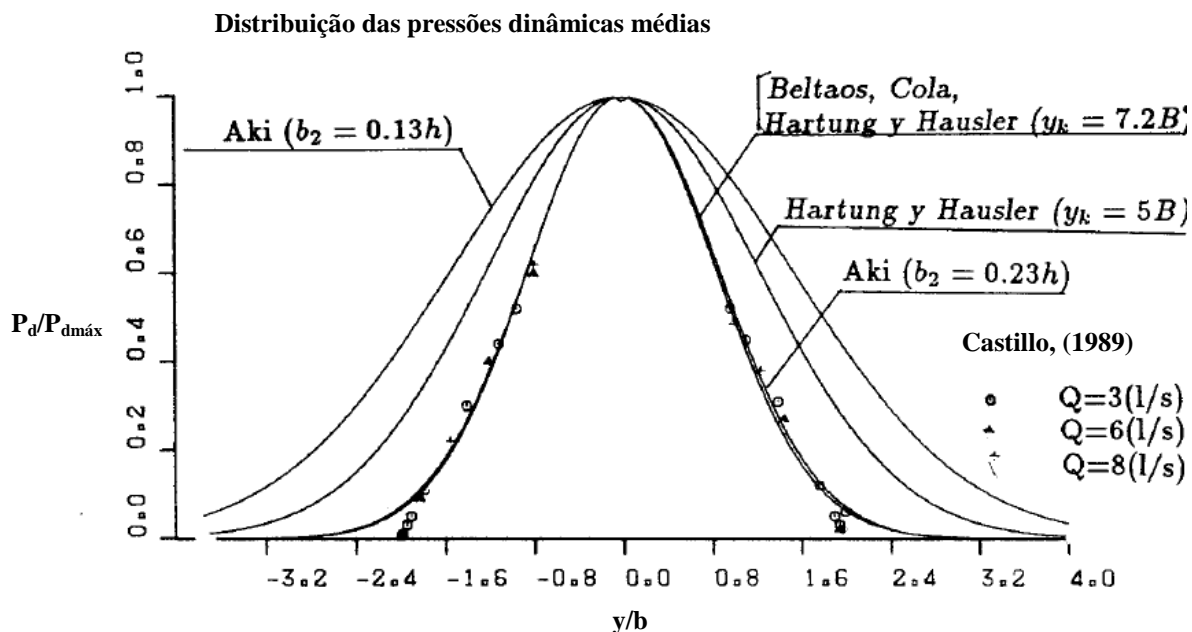


Figura 14 – Distribuição de pressões dinâmicas médias para as diferentes equações apresentadas.

(FONTE: adaptado de CASTILLO, 1989)

As proposições de Beltaos, Cola e Hartung e Hausler ($x_c=7.20 \cdot B_j$) e os dados de Castillo sobre-estimam as pressões dinâmicas médias, tanto em magnitude como no tamanho da área de influência.

Hartung e Hausler (1973), para jatos verticais incidindo sob um colchão de água, apresentam, para a pressão dinâmica máxima (P_{dmax}), a Equação 35.

$$\frac{P_{dmax}}{\gamma} = 5 \cdot \rho_w \cdot \frac{V_j^2}{2} \cdot \frac{B_t}{h} \quad \text{Equação 35}$$

Onde:

P_{dmax} é a pressão dinâmica máxima no ponto de estagnação (m);

h é a espessura do colchão de água ($h > x_c$) (m);

B_t é a espessura do jato (m);

ρ_w é a massa específica da água (kg/m^3);

γ é o peso específico da água (N/m^3);

V_j é a velocidade na entrada do colchão (m/s).

Puertas (1994), com o objetivo de encerrar a linha de pesquisa de Castillo (1989), portanto utilizando a mesma bancada de ensaios, complementa os estudos onde conclui que, se o jato alcança a bacia de modo compacto e a pressão máxima tende a ser a própria altura de queda ($H-h$), então a pressão dinâmica máxima no ponto de estagnação ($P_{dm\acute{a}x}$) pode ser conhecida por meio da Equação 36.

$$P_{dm\acute{a}x} = 3,88 \cdot \frac{\gamma \cdot q \cdot \sqrt[2]{H-h}}{h \cdot \sqrt[2]{2 \cdot g}} \quad \text{Equação 36}$$

Onde:

$P_{dm\acute{a}x}$ é a pressão dinâmica máxima (m);

γ é o peso específico da água (N/m^3);

q é a vazão específica ($m^2/m.s$);

h é a espessura do colchão d'água (m);

H é a distância vertical entre o ponto de lançamento até o fundo do canal (m).

A expressão (36) é válida sempre que um colchão efetivo h_0 for garantido (CASTILLO, 2006). Sendo, neste caso, h_0 expresso pela Equação 37:

$$h_0 > \left[\frac{0,113}{\sqrt[2]{2 \cdot g}} \cdot (H-h) \cdot q \right]^{2/5} \quad \text{Equação 37}$$

Onde:

h é a espessura do colchão d'água (m);

H é a distância vertical entre o ponto de lançamento até o fundo do canal (m);

q é a vazão específica (m^2/s);

g é a aceleração da gravidade (m/s^2).

Castillo (2002) estudou as pressões provocadas por um jato vertical na zona de impacto com diferentes aparelhos de medição, diferentes configurações de ar/água (ar/ar, água/ar e água/água) e apresentou uma formulação geral, Equação 38 e Equação 39, a qual apresenta a pressão dinâmica máxima e sua distribuição.

$$\frac{P_{dm\acute{a}x}}{\gamma} = K \cdot \rho_w \cdot \left(\frac{V^2}{2} \right) \cdot \frac{B}{h} = \frac{K \cdot q \cdot (H - h)^2}{h \cdot \sqrt[2]{2 \cdot g \cdot (H - h)^3}} \quad \text{Equação 38}$$

$$P_{y/h} = \frac{P_{dm\acute{a}x}}{\gamma} \cdot e^{-w|x/h|^2} \quad \text{Equação 39}$$

Onde:

$P_{dm\acute{a}x}$ é a pressão dinâmica máxima (m);

K é um coeficiente adimensional;

w é o expoente que admite valor 25 para colchões da água não efetivos e 30 para colchões efetivos.

A equação é válida para $h/B > 4-5$ e para $x_k/x_c < 0,5$.

Na Tabela 2, Castillo (2002) compila os valores dos coeficientes K e w presente na fórmula geral, para diferentes autores.

Tabela 2 – Coeficientes K e w para formula geral.

Autor	K	w	Características do ensaio	Meios	Observações
Cola (1965)	7,18	40,51	B = 12 - 24 mm h = 0,165 – 0,835 m V _o = 1,3 – 4,8 m/s	Água Jato submerso sem aeração Bidimensional simétrica	
Hartung & Häusler (1973)	5	19,6	Jato teórico Profundidade de desintegração: $x_k=5B$	Água Profundidade do jato ilimitada	Se o jato for considerado violento, então K=3,56; w=9,92
Beltaos (1976)	8	42,00	B = 0,224 cm h/B = 45,5 – 68,2	Ar Bidimensional Diferentes ângulos de choque	Verificação do ajuste da eq. Schauer & Eutis
Cui Guang et. al ¹⁷ (1985)	5,2 - 6,35	12,56	Modelo sem escala Protótipo Q = 80m ³ /s (H-h) = 165-187m H = 32,5 – 54,9m,	Água Bidimensional assimétrica (modelo de barragem em arco)	Possível efeito de escala desconhecido do ensaio
Armengou ¹⁸ (1991)	3,19	25	(H-h) = 1,8 – 5,5 m Q < 50 l/s H = 0,08 – 0,80m V = 6 – 10,4 m/s (H-h)/x _b = 0,4 – 2,73	Água Bidimensional assimétrica Jato aerado	Primeiros valores vindos de ensaios experimentais de instalação
Puertas (1994)	3,88	2	(H-h) = 1,85 – 5,45m Q < 86 l/s h = 0,08 – 0,80 m V = 6 – 10,4 m/s (H-h)/x _b = 0,4 – 2,73	Água Bidimensional assimétrico Jato aerado	O expoente da eq. (39) é 0,5
Ervine et. al (1997)	38,4(1-C _i)(B/h)	25-30	(H-h) = 0,51 – 2,63m Q < 63 l/s h = 0,10 – 0,5m V = 4 - 25 m/s (H-h)/x _b < 0,5	Água Jato circular Jato aerado	em B considerar termo do espalhamento lateral pela turbulência.

(FONTE: adaptado de CASTILLO, 2002)

3.4.3 Flutuação de pressão

Conforme já foi abordado, quando o jato impacta na soleira com o núcleo ainda compacto, tem-se o aumento das pressões. Por outro lado, quando o núcleo se desenvolve, ou seja, sua desintegração foi completa, ocorrem valores de pressões, em módulo, menores, mas há um aumento na flutuação de pressão. Lencastre (1984)

¹⁷ CUI GUANG, T., LIN, R., LIANG, R. Efeito do impacto, no leito do rio, da lamina descarregada sobre uma barragem abóboda. Tradução do chinês por J. A. Pinto de Campos. LNEC, Lisboa. 1985.

¹⁸ ARMEGOU, J. Vertido libre por coronación en presas bóveda. Análisis del campo de presiones en el cuenco amortiguador. Tese de Doutorado pela Universidade Politécnica da Catalunha: Barcelona, 1991.

observa que são exatamente as flutuações de pressão que são capazes de levantar as lajes de fundo, mesmo ancoradas, devido à propagação das pressões turbulentas.

O conhecimento da flutuação de pressão, segundo Trierweiler (2006), pode fornecer informações importantes para o projeto de estruturas, além de fornecer subsídios para a compreensão dos processos de dissipação de energia.

A flutuação de pressão P' é determinada a partir da pressão instantânea e da pressão média, tal como a Equação 40.

$$P' = P - P_m \quad \text{Equação 40}$$

Castillo (1989) define que o desvio padrão da amostra de pressões instantâneas representa a flutuação quadrática média (variância no caso de processos aleatórios estacionários) de acordo com a Equação 41.

$$\sigma = \sqrt{P'^2} \quad \text{Equação 41}$$

Segundo Yuditskii (1985), deve-se ter grande atenção ao valor de amplitude máxima de flutuação de pressão ($\lambda_{\text{máx}}$), visto ser na zona dessas oscilações máximas que a erosão do leito é mais intensa. Dessa forma, o autor propõe escrever uma relação adimensional, Equação 42, para calcular ($\lambda_{\text{máx}}$). Nota-se a relevância em destacar que o autor não explicita qual a amplitude máxima.

$$\frac{\lambda_{\text{máx}}}{(H - h)} = f\left(\frac{h_o}{h_{\text{cr}}}\right) \quad \text{Equação 42}$$

Onde:

$\lambda_{\text{máx}}$ é a amplitude máxima da flutuação;

h é a espessura do colchão d'água (m);

H é a distância vertical entre o ponto de lançamento até o fundo do canal (m);

h_o colchão efetivo (m);

h_{cr} profundidade crítica do escoamento (m).

A partir disso, o autor apresenta o gráfico, mostrado na Figura 15, e conclui que a amplitude máxima ($\lambda_{\text{máx}}$), adimensionalizada pela altura de queda ($H-h$), pode atingir o

valor de 1,6 para o leito não erodido (fundo plano) e nível mínimo de jusante. Quando $\frac{h}{h_{cr}}$ aumenta, observa-se uma acentuada diminuição na amplitude das flutuações. Pode-se, assim, encontrar um único parâmetro característico da altura de água na zona de queda do jato, que amortece a ação dinâmica desse.

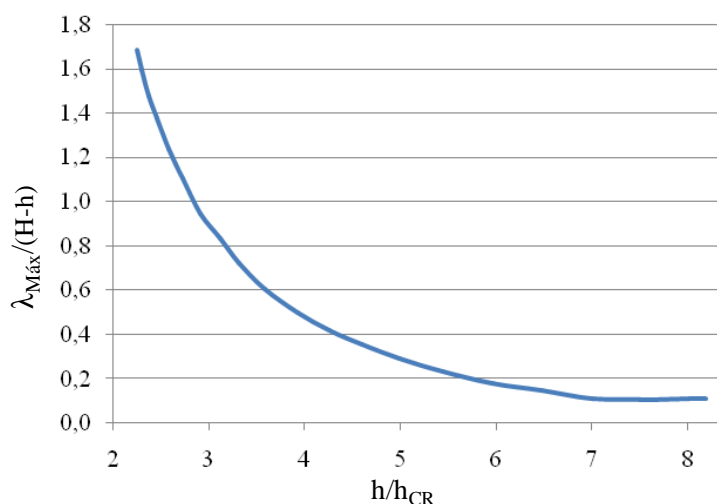


Figura 15 – Variação da amplitude máxima de flutuação com profundidade do colchão (adaptado de YUDITSKII, 1985).

(FONTE: arquivos do Laboratório de Obras Hidráulicas)

É importante destacar que, embora sejam relações adimensionais, o autor obteve os resultados a partir de jatos provenientes de salto esquí.

3.4.4 Frequências Dominantes

Souza (2014) assinala que os escoamentos reais que apresentam interações com paredes, separação e instabilidades produzem estruturas de grande escala, o que significa baixas frequências. Além disso, a maioria dos estudos mostra grande energia espectral em baixas frequências, ou seja, 0 a 20 Hz. A exemplo: Lencastre (1961) encontrou frequências entre 1 e 4 Hz, Ramos (1988) entre 0 e 3 Hz. Puertas e Dolz (2005) indicam um range de frequências dominantes entre 0 e 2 Hz.

Lencastre (1961) apontou que a densidade espectral alcança um máximo para as frequências entre 1 e 4 Hz. Estudos de Ramos e Falcão de Melo (1992 apud PINTO, 1994) situam o espectro dominante entre 0.5 e 2,5 Hz.

A largura do espectro de flutuação e, por conseguinte, as diferenças entre os grandes e pequenos turbilhões crescem com o aumento do número de Reynolds. Segundo Rodi (1980), é principalmente o escoamento macroturbulento que transporta quantidade de movimento e contribui para as correlações turbulentas.

Como mostra a Figura 16, duas frequências dominantes estão presentes na bacia de dissipação. As menores frequências, correspondendo ao número de *Strouhal* da ordem de 0,01, estão atreladas aos grandes vórtices (da ordem da profundidade da bacia), enquanto os vórtices com maior frequência têm, de acordo com Ervine et al. (1997), metade da largura da camada de cisalhamento. Nessa situação, o número de *Strouhal* apresenta um valor aproximadamente igual a 0,25.

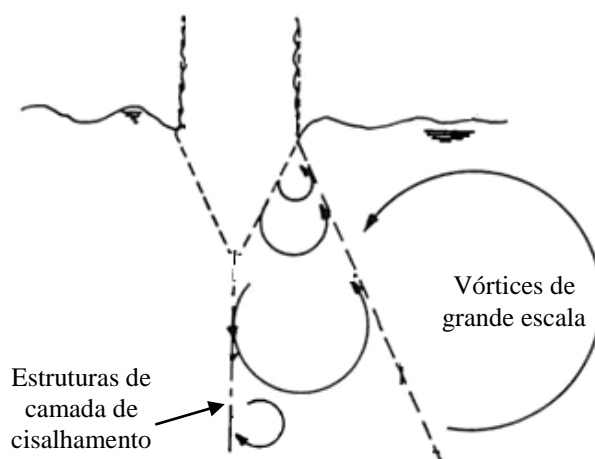


Figura 16 – Estruturas de vórtices no interior da bacia de dissipação.

(FONTE: adaptado de ERVINE et. al.,1997)

Manso (2006) estudou a influência da profundidade da bacia e, consequentemente, a espessura do colchão d'água e identificou que para as bacias com fundo plano e raso, cujo núcleo do jato atinge o fundo da soleira, têm-se decaimentos suaves nos espectros e, à medida que a profundidade aumenta, existem declinações mais acentuadas as quais se distribuem entre 20 Hz e 30 Hz. Para o ensaio referente à bacia rasa limitada, o espectro continha energia entre as frequências 20 e 100 Hz, portanto mais altas que para

bacias com fundo plano. Para as bacias profundas, o autor aponta que as frequências contidas no espectro das bacias confinadas são, geralmente, menores que as correspondentes ao espectro das bacias com fundo plano. A Figura 17 apresenta os resultados de Manso (2006). Vale apontar, ainda, que a declividade destacada ($-5/3$) indica a região do equilíbrio universal, região associada à dissipação viscosa de energia do escoamento.

Já na Figura 18, Manso (2006) mostra a presença de oscilações de baixa frequência e explica que estes espectros são típicos de condições de impacto onde o núcleo do jato está plenamente desenvolvido.

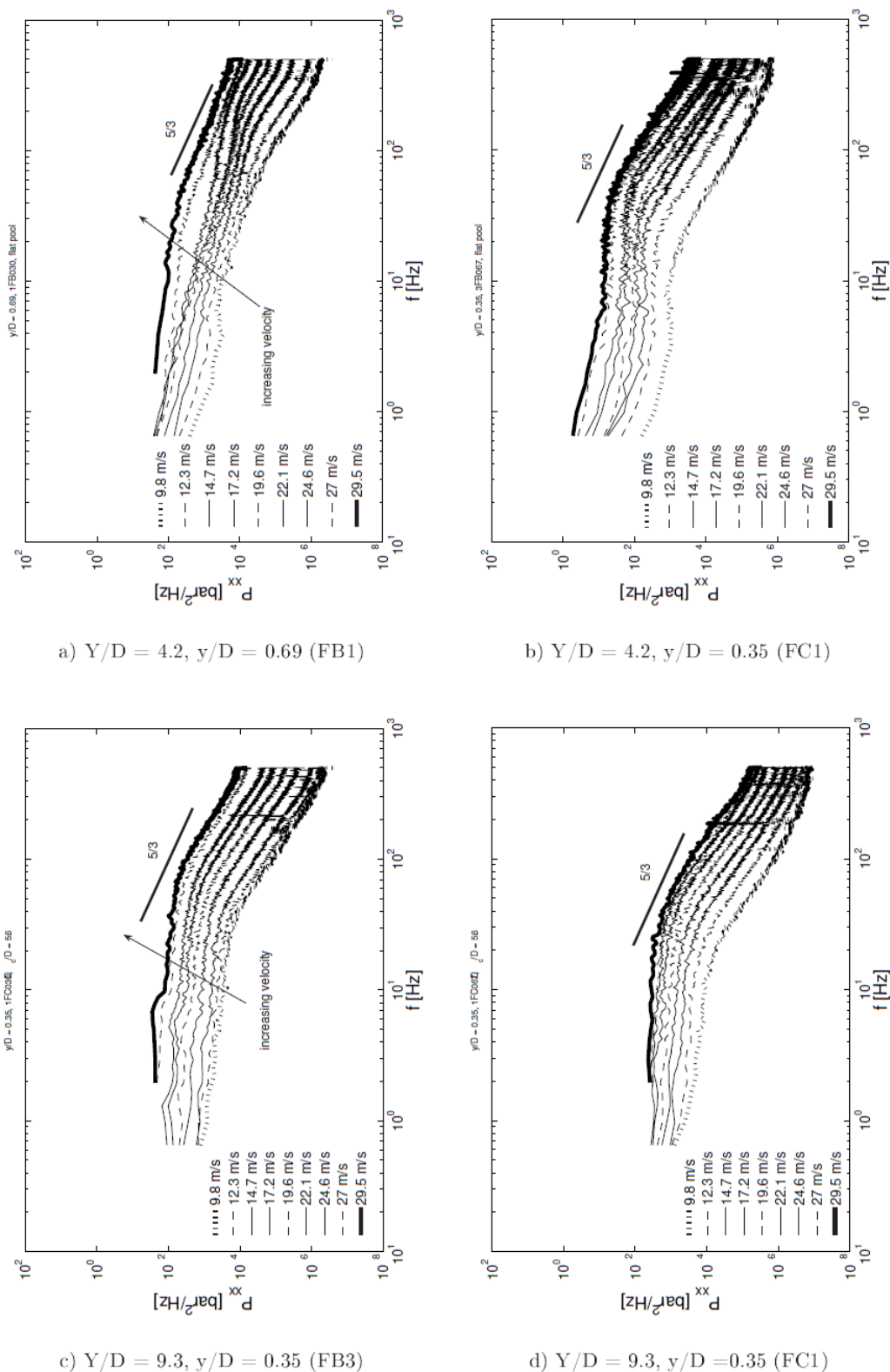
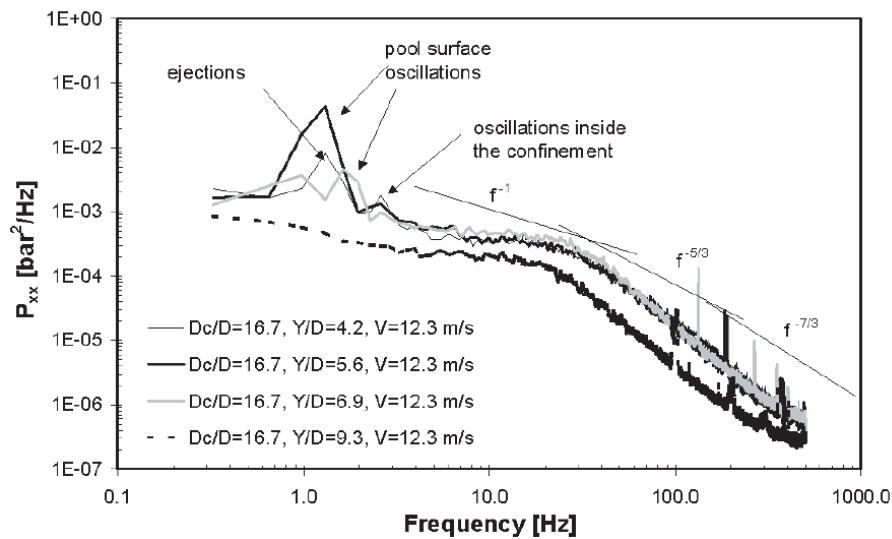


Figura 17 – Densidade do espectro de potências (P_{xx}) em termos da velocidade: à esquerda, tem-se os espectros respectivos a bacia com fundo plano (FB); e a direita, bacia confinada (FC).

(FONTE: MANSO, 2006)



*Y/D profundidade relativa da bacia.

Figura 18 – Densidade espectral para a condição em que o núcleo do jato, no momento do impacto, está plenamente desenvolvido.

(FONTE: MANSO, 2006)

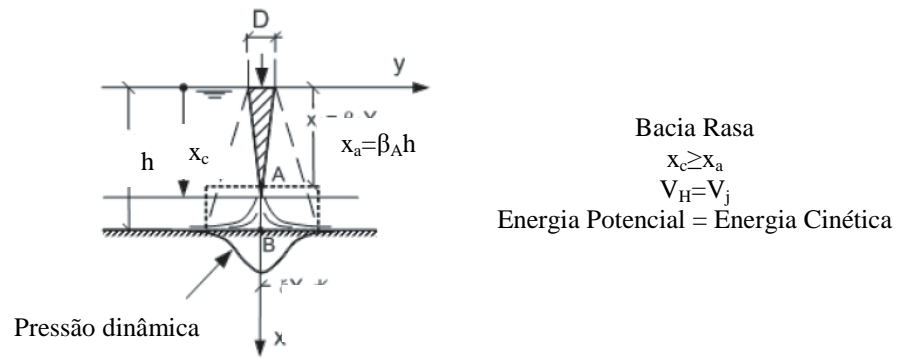
3.4.5 Modelo de difusão

Manso (2006) aponta ser possível conhecer a pressão no ponto de estagnação a partir da eficiência de dissipação na soleira. O autor desenvolveu um modelo de difusão do jato numa bacia limitada, denominado LDDM (Limited-depth diffusion model). O modelo foi baseado nas seguintes premissas:

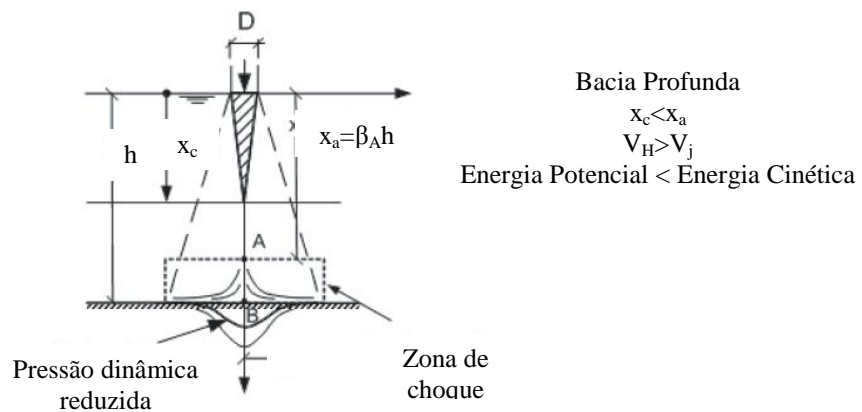
- Dois cenários: no que tange à difusão do jato e no que tange ao desenvolvimento do núcleo, Figura 19.

Cenário 1 – é quando o núcleo do jato tem comprimento (x_c) maior que a distância da superfície até a zona de choque (x_a). Neste caso, pode-se assumir que a energia cinética é a mesma que no lançamento do jato, casos de bacia rasa.

Cenário 2 – quando existe uma dissipação de energia, pois o núcleo do jato quebra antes de chegar na zona de choque. Nesse caso, as pressões dinâmicas são menores e diz-se que a bacia é profunda.



(cenário – 1)



(cenário – 2)

Figura 19 – Padrões de difusão de jatos imergentes de acordo com o modelo LDDM.

(FONTE: adaptado de MANSO, 2006)

- A velocidade no impacto com a superfície do colchão pode ser assumida como a velocidade de queda, logo ($V_H = V_j$).
- O diâmetro D_i no impacto é o diâmetro médio do núcleo do jato, de acordo com Ervine et. al. (1997), Equação 43. Não considera o espalhamento do jato.

$$D_i = D_0 \cdot \sqrt[2]{\frac{V}{V_H}} \quad \text{Equação 43}$$

Onde

V é a velocidade média da linha central do jato (m/s).

- A zona de choque é definida por Gutmark (1978), sendo $\beta_A = 0,75 \cdot h$.
- O comprimento do núcleo x_c foi definido considerando $C_d = 5$.
- Ângulo de difusão externo (α_2) constante, definido por Ervine e Falvey (1987) para jatos com $Tu = 5\%$.
- A pressão no ponto de impacto é estimada com base na conversão total da energia cinética, ou seja, sem perdas ao longo da queda.
- A velocidade do núcleo do jato é assumida como $V_{\max,x} = V_H$.
- Na hipótese, no caso em que ($x_a < x_c$), a velocidade no núcleo é estimada assumindo $C_v = 5$ e usando a velocidade na entrada da bacia (V_j).
- No caso em que ($x_a > x_c$) a pressão no impacto é corrigida em função da influência do ar. A correção é feita pelo fator $(1 - C_{air})^\theta$, onde C_{air} é a concentração média de ar (essa correção visa agregar a contribuição das bolhas de ar contidas no colchão). De acordo com Melo¹⁹ (2002), $\theta = 1,345$ para bacias com fundo plano.

(MANSO, 2006)

Sendo assim, Manso (2006) define a eficiência da dissipação de acordo com a Equação 44.

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad \text{Equação 44}$$

Onde:

E_1 é a energia cinética na entrada do colchão da água (m);

E_2 é medida ou estimada no ponto de impacto (m).

A energia excedente no impacto (E_2) é calculada para cada caso, como segue:

$$E_2 = \frac{P_{d\max}}{\gamma} = \frac{V_j^2}{2g} \text{ para } h < \frac{C_d \cdot D_i}{\beta_A} \quad \text{Equação 45}$$

¹⁹ MELO, J. F. Reduction of plunge pool floor dynamic pressure due to jet air entrainment, in Schleiss and Bollaert (eds), **Rock scour due to falling High-velocity Jets**. Swets and Zeitlinger, Lisse. p 125 – 136.

$$E_2 = \frac{P_{dm\acute{a}x}}{\gamma} = \left[\frac{C_v \cdot D_i \cdot V_j}{\beta_A \cdot h} \right]^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot g} \cdot (1 - C_{air})^{1,345} \text{ para } h > \frac{C_d \cdot D_i}{\beta_A} \quad \text{Equa\c{c}\~ao 46}$$

Os valores de press\~ao s\~ao transferidos, ent\~ao, para a linha central do jato pela Equa\c{c}\~ao 47 e Equa\c{c}\~ao 48 proposta por Ervine et. al. (1997):

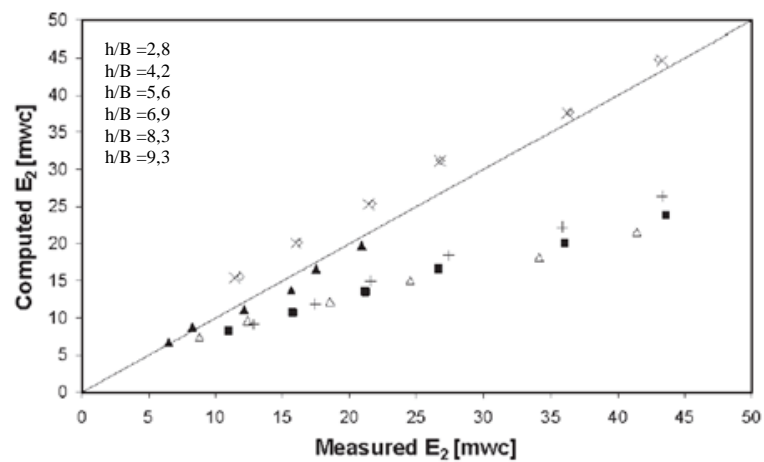
$$P_{axis} = \frac{P_{\frac{x}{B}=0,35}}{e^{-30 \cdot \left[\frac{x}{B \cdot h} \right]^2}} = \text{para } h/B \leq 5,6 \quad \text{Equa\c{c}\~ao 47}$$

$$P_{axis} = \frac{P_{\frac{x}{B}=0,35}}{e^{-50 \cdot \left[\frac{x}{B \cdot h} \right]^2}} = \text{para } \frac{h}{B} > 5,6 \quad \text{Equa\c{c}\~ao 48}$$

Isto corresponde a assumir que a press\~ao m\~axima \acute{e} atingida na linha central, o que pode n\~ao ser sempre o caso, devido ao deslocamento do ponto de estagna\c{c}\~ao, conforme pontuam Kamoi and Tanaka²⁰ (1972 apud PINTO, 1994).

O modelo anal\itico (LDDM) foi comparado com os dados experimentais e, de acordo com o autor, apresentou estimativas razo\~aveis. Para as bacias profundas ($h/B = 9,3$) o modelo apresentou bons resultados, por outro lado, para as bacias rasas ($h/B < 4,2$) houve discord\~ancia entre os dados experimentais e os anal\iticos. Na Figura 20 pode ser conferida a compara\c{c}\~ao.

²⁰ KAMOI, A., TANAKA, H. Measurement of wall shear stress, wall pressure and fluctuations in the stagnation region produced by oblique jet impingement. **Fluid Dynamic Measurements**. Conference Papers. Leicester: University Press, 1972. v.1. p. 217 – 227.



* h/B profundidade relativa da bacia.

Figura 20 – Comparação entre a energia E_2 medida e a energia E_2 calculada.

(FONTE: MANSO, 2006).

De acordo com a análise da figura, verifica-se que a energia calculada é sempre superior à medida. Nesse quesito o modelo se apresenta conservador, mas a favor da segurança.

3.5 NÚMEROS ADIMENSIONAIS NO ESTUDO DE DISSIPACÃO DE ENERGIA POR JATOS

A utilização de parâmetros adimensionais para a análise confere aos resultados um caráter universal, que dentro da faixa de valores ensaiadas permite a sua utilização em nível de projeto em estruturas do gênero.

Carvalho & Nieckele (2008) afirmam que, para a análise da influência da distância entre a saída do jato e o ponto de impacto da pressão, é o coeficiente de pressão chamado C_p Equação 49

$$C_p = \frac{P_m - P_{ref}}{\frac{\rho_w \cdot V_0^2}{2}} \quad \text{Equação 49}$$

Onde:

P_m é a pressão média (m);

P_{ref} é a pressão de referência, geralmente a pressão atmosférica (m);

V_0 é a velocidade de saída do jato (m/s).

Ervine et al. (1997) e Manso (2006) apresentam e denominam de C_p outra maneira de relacionar as grandezas. Essa forma é indicada para bacias com fundo plano, Equação 50.

$$C_p = \frac{|P_m - P_{atm}| - h}{\frac{V_j^2}{2 \cdot g}} \quad \text{Equação 50}$$

Onde:

P_m é a pressão média (m);

P_{atm} é a pressão atmosférica (m);

h é a espessura do colchão da água (m);

V_j é a velocidade de entrada do colchão d'água (m/s).

A diferença entre uma proposta e a outra para o cálculo do C_p , reside no fato que, na Equação 50, a espessura do colchão da água é subtraída. Dessa forma, o adimensional representa a relação entre forças de pressão dinâmica e forças de inércia.

Manso (2006) compara seus resultados com os dados de Ervine et al. (1997) por meio do gráfico apresentado na Figura 21. Destaca-se, de acordo com o autor, que no gráfico só são apresentados jatos com o núcleo no momento do impacto, os jatos com núcleo difuso apresentam pressões menores que os jatos com núcleo persistente.

Ervin et. al. (1997) explicam que a pressão dinâmica de um jato em queda livre é menor que a de jatos submersos. Isso pode ser visto por meio da Figura 21, linha sólida, onde o coeficiente de pressão alcançou um máximo de 0,86 devido ao espalhamento e a entrada de ar para dentro do colchão d'água.

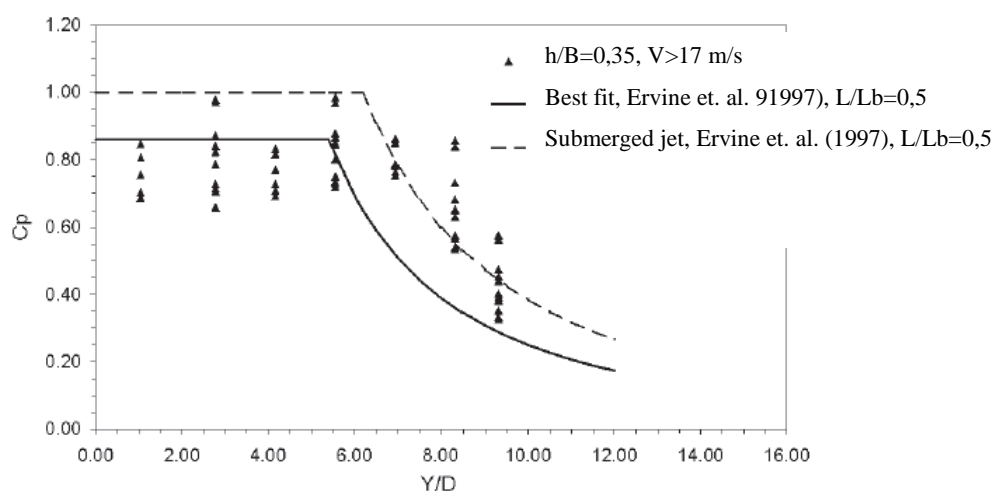


Figura 21 – Coeficiente de pressão dinâmica para $h/B = 0,35$ em função da profundidade relativa

(FONTE: MANSO, 2006).

Castillo (2006) apresenta o gráfico de C_p como uma função da espessura do colchão (h) em relação à espessura do jato no impacto (B_j), da distância vertical entre o lançamento do jato até a superfície do colchão da água em relação ao comprimento x_c .

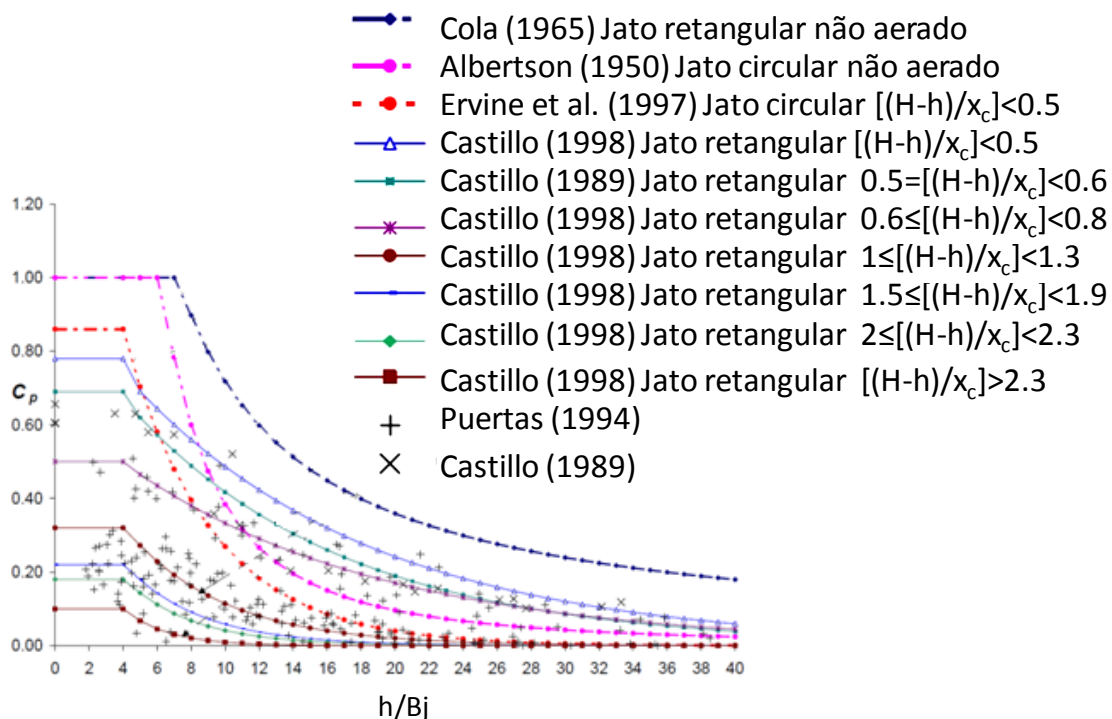


Figura 22 – Coeficiente de pressão média dinâmica para jatos retangulares e escoamentos com quedas sucessivas.

(FONTE: adaptado de CASTILLO, 2006)

Por meio da Figura 22, o autor concluí, como já exposto, que a zona de estabilização ocorre para a profundidade $4B_j$.

Puertas (1994) define outros três (3) adimensionais relevantes para a análise gráfica dos resultados de pressão, conforme Equação 51, Equação 52 e Equação 53.

$$A_{D1} = \frac{P}{\gamma \cdot (H - h)} \quad \text{Equação 51}$$

$$A_{D2} = \frac{h}{H - h} \quad \text{Equação 52}$$

$$A_{D3} = \frac{\frac{q}{\sqrt{g}}}{(H-h)^{3/2}} \quad \text{Equação 53}$$

²¹ Conceitualmente é o número de Froude, com a relação entre a espessura do jato na base do impacto e a altura de queda (H-h). Assumindo a velocidade do jato como V_H , considerando que a vazão específica

Onde:

P é a pressão(m);

H é a distância vertical entre o lançamento do jato até o fundo do canal (m);

h é a espessura do colchão da água (m);

q é a vazão específica ($\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$);

ρ_w é a massa específica da água (kg/m^3);

γ é o peso específico da água (N/m^3);

g é a aceleração da gravidade (m/s^2).

Rand²², Bakhmeteff e Feodoroff²³ e Moore (1955; 1943; 1943 apud PINTO, 1994), baseados em dados experimentais, definiram que a geometria do fluxo em estruturas de queda pode ser descritas como função de um parâmetro adimensional, denominado número de queda, o qual se define pela Equação 54:

$$N_q = \frac{q^2}{g \cdot (H - h)^3} \quad \text{Equação 54}$$

Onde:

N_q é o número de queda;

q é a vazão específica ($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$);

H é a distância vertical entre o lançamento do jato até o fundo do canal (m);

h é a espessura do colchão da água (m);

g é a aceleração gravitacional (m/s^2).

As relações geométricas são apresentadas como segue: Equação 55, Equação 56 e Equação 57 (PINTO, 1994):

$$\frac{L}{H - h} = 4,30 \cdot N_q^{0,27} \quad \text{Equação 55}$$

pode ser expressa por $q = V \cdot B$, a espessura do jato será q/V e, portanto, $\frac{q}{\sqrt[2]{2 \cdot g \cdot H}}$. O fator $\frac{1}{\sqrt[2]{2}}$ não afeta a análise adimensional.

²² RAND, W. Flow Geometry at straight drop spillways. **PROC. ASCE**. v.8. p. 1 – 13.n.791. Sept, 1955.

²³ BAKHMETEFF, B. A. FEODOROFF, N. V. Discussion on energy loss at the base of the overall, by Walter L. Moore. **TRANS. ASCE**. v. 108. p. 1364 – 1373. 1943.

$$\frac{h_p}{H - h} = 2 \cdot N_q^{0,22} \quad \text{Equação 56}$$

$$\frac{h_1}{H - h} = 0,54 \cdot N_q^{0,425} \quad \text{Equação 57}$$

Onde:

L é o comprimento do poço de acumulação em estruturas de queda (m);

h_p é a profundidade do poço de acumulação (m);

h_1 e h_2 são as profundidades conjugadas do ressalto hidráulico (m).

O autor destaca, ainda, que estes resultados devem ser utilizados apenas em nível de anteprojeto, para poder-se definir as dimensões do modelo hidráulico do protótipo em estudo.

3.6 EFEITOS DE ESCALA

Martins²⁴ (1973 apud PINTO 1994) cita que o estudo em modelos hidráulicos de jatos livres, provenientes de estruturas, apresenta uma dificuldade básica: a impossibilidade de satisfazer as três semelhanças pertinentes: Froude, Reynolds e Weber. Mesmo que se abstraia a ação da viscosidade, mostra-se facilmente que a conciliação das semelhanças de Froude e de Weber exige a utilização no modelo de um líquido com uma tensão superficial λ^2 vezes menor que a da água (sendo λ o denominador da escala geométrica e admitindo-se que a massa específica deste líquido seja igual à da água). Sendo assim, os estudos devem ser conduzidos em modelos cujas escalas garantam valores mínimos do número de Reynolds e Weber.

No que respeita à dissipação de energia em um fluido, no meio de um fluido da mesma natureza, existem medições efetuadas por vários pesquisadores, segundo os quais, para valores de Reynolds maiores que 10^5 , os efeitos da viscosidade eram, praticamente, desprezíveis, sendo válida a semelhança de Froude (LENCASTRE, 1984).

Estudos descritos por Ramos (1988) e referentes a um protótipo e um modelo à escala 1:33, explorado de acordo com a lei de Froude e valores de número de Reynolds, entre $1 \cdot 10^5$ e $6,6 \cdot 10^4$, mostraram que a concentração de ar existente no protótipo e os turbilhões de pequena escala têm efeito desprezível nos parâmetros estatísticos das flutuações de pressão.

A tensão superficial é característica importante, no que tange a manter o jato unido. Portanto, o número de Weber pode ser importante. Lemos e Ramos (1985²⁵ apud PINTO, 1994) compararam os resultados obtidos em modelos Froudianos com escalas diferentes. No de redução geométrica em 1:20, onde o número de Weber é 36,5, os efeitos devido à tensão superficial foram considerados irrelevantes, e no de 1:50, onde o número de Weber é de 14,6, observou-se grande efeito de escala devido à ação da

²⁴ MARTINS, R. B. **Ação erosiva de jactos livres a jusante de estruturas hidráulicas**. LNEC, Memória 424. 79 f. Lisboa, 1973..

²⁵ LEMOS, F. O.; RAMOS, C. M. Hydraulic modeling of free jet energy dissipation. **In: Symposium on scale effects in modeling hydraulic structures**. Esslingen am Neckar, Germany, 1987. Proceedings. 2a.ed. Esslingen: Technische Akademie Esslingen /1985 / 1 v. Sec. 7.6, p. 1-5.

tensão superficial. D'Alpaos e Ghetti²⁶ (1984 apud PINTO, 1994) mostram que em escoamentos com lâminas de água inferiores a 4 cm, o efeito da tensão superficial na geometria da lâmina é importante.

²⁶ D'ALPAOS, L. GHETI, A. Some new experiments on surface tension and viscosity effects on the trajectory of a falling jet. **In. Symposium scale effects in modeling hydraulic structures**. Esslingen am Neckar, Germany, 1984. Proceedings. Esslingen: Technische Akademie Esslingen, 1984 / 1 v. Sect. 2,5. p. 1-8.

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada consiste na análise da magnitude e da distribuição das pressões junto ao fundo de um canal plano, provocadas pela incidência, vertical, de um jato de água.

Os dados de pressão utilizados foram obtidos em um modelo físico, localizado no Laboratório de Obras Hidráulicas (IPH/UFRGS), que foi instrumento do P&D intitulado “Estudo dos processos geomecânicos provocados por esforços hidrodinâmicos em fossas de erosão a jusante de salto esquí”, em uma parceria firmada entre Furnas Centrais Elétricas S.A, Fundação de Apoio da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – FAURGS e Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), através do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) no ano de 2008.

O modelo foi construído em aço, com painéis laterais em acrílico na região de estudo. A estrutura possuía comprimento de 10 m, excluindo-se as coifas a jusante e a montante, e 0,4 m de largura, Figura 23. A alimentação do modelo foi feita por um conjunto motobomba (50 CV) controlado por um inversor de frequência, ao qual recalcava a vazão desejada por uma tubulação de 300 mm de diâmetro.

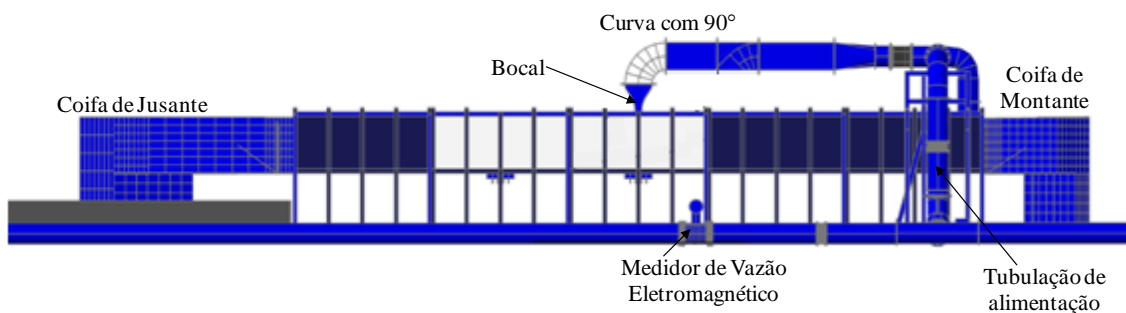


Figura 23 – Esquema do modelo utilizado para a coleta de dados.

(FONTE: Arquivo do Laboratório de Obras Hidráulicas).

Compunha o modelo, ainda, Figura 24, um registro de gaveta de 300 mm de diâmetro localizado na tubulação principal (2) e um registro gaveta de 50 mm de diâmetro localizado no bypass (3). A medição de vazão foi realizada por um medidor de vazão eletromagnético da marca Rosemount, com precisão de 0,15% da taxa de vazão

volumétrica sobre diminuições de vazão de 13:1, 0,25% sobre diminuições de vazão de 40:1, além de estar localizado a 28,65 m da curva de entrada do modelo (1).

Duas juntas gibault (4) e uma junta mecânica (luva de correr) foram instaladas para obter-se uma maior mobilidade da tubulação de alimentação. Dessa maneira, tem-se maior precisão na incidência do jato no centro do canal.

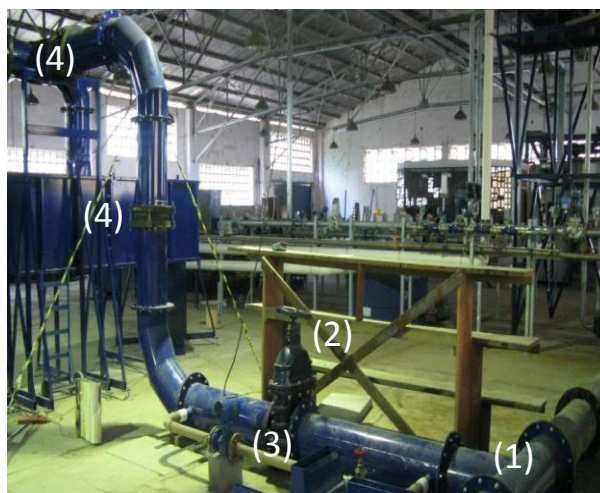


Figura 24 – Sistema de alimentação do modelo.

(FONTE: Arquivo do Laboratório de Obras Hidráulicas).

Na porção superior do modelo, a tubulação passa por uma mudança de seção assinalada na Figura 25. A seção circular passa para seção quadrada com dimensões de 400 mm x 400 mm flangeada em pequenas partes, objetivando a colocação do bocal de seção retangular medindo 400 mm x 25 mm de espessura, Figura 26. O jato estava posicionado perpendicularmente ao fundo do canal a 92 cm de altura, Figura 27.



Figura 25 – Porção superior do modelo, onde se localiza a estrutura que direciona o escoamento ao bocal.

(FONTE: Arquivo do Laboratório de Obras Hidráulicas).

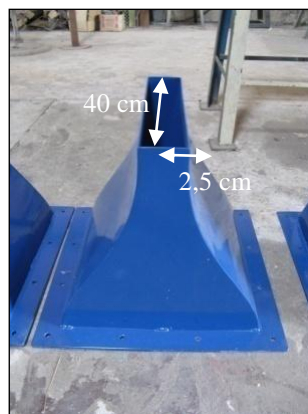


Figura 26 – Bocal do jato direcionado.

(FONTE: Arquivo do Laboratório de Obras Hidráulicas).

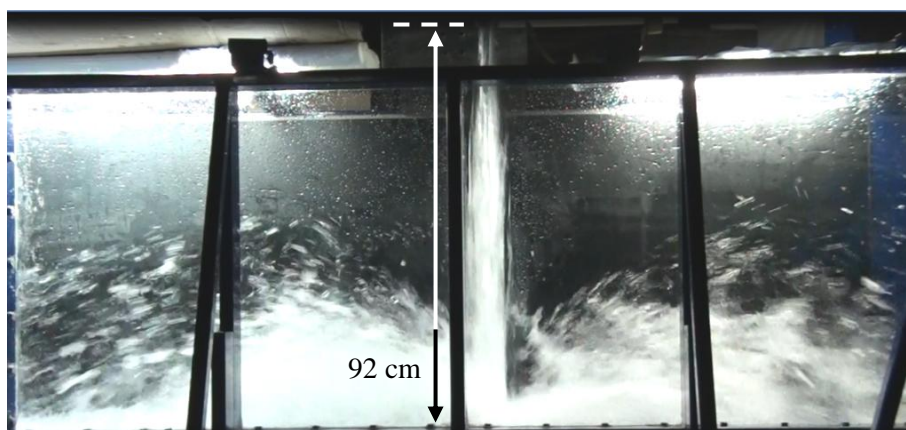


Figura 27 – Imagem do jato incidindo perpendicularmente ao fundo do canal, $Fr_1 = 7,12$.

(FONTE: Arquivo do Laboratório de Obras Hidráulicas).

4.1 METODOLOGIA DE ENSAIO

O ensaio padrão consistiu em fixar as condições hidráulicas e geométricas, tais como: ajuste do bocal a 90° sobre o fundo do canal, vazão (Q), espessura do colchão da água (h), pontos de medida (y), distância vertical da saída do bocal até o fundo do canal (H), para posterior coleta das pressões, as quais foram obtidas através de transdutores de pressão, durante o intervalo de tempo de 10 minutos, a uma frequência de aquisição de 128 Hz, resultando em 76800 valores de pressão, garantindo, assim, a estacionariedade e ergodicidade da amostra.

Uma verificação da adequabilidade do tempo de coleta de dados foi realizada dividindo-se a amostra em grupos que representavam a aquisição em 1 minuto (10 grupos), 2,5 minutos (4 grupos), 5 minutos (2 grupos) e 10 minutos (tempo de coleta). Calculou-se, então, a média e o desvio padrão de cada amostra. Por meio da Figura 28 e da Figura 29 é possível verificar que a partir de 10 minutos de amostragem, a média e o desvio padrão tendem ao mesmo valor para tempo de aquisição superior a 10 minutos.

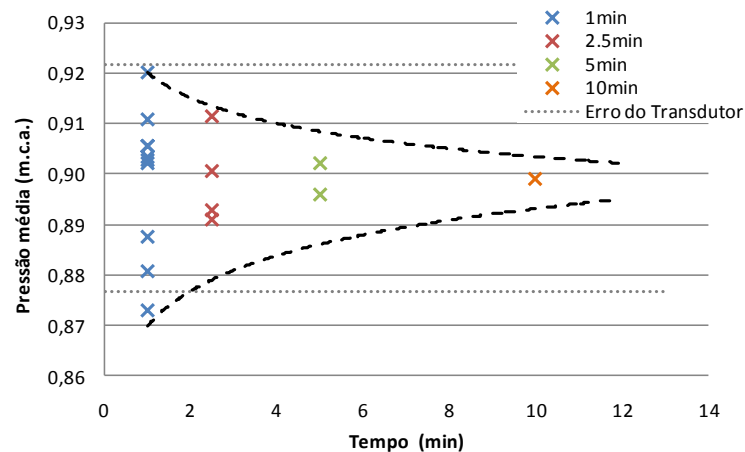


Figura 28 – Avaliação do tempo de coleta de dados. Os valores de pressão média correspondem a $Fr_1 = 14,23 - S = 2$.

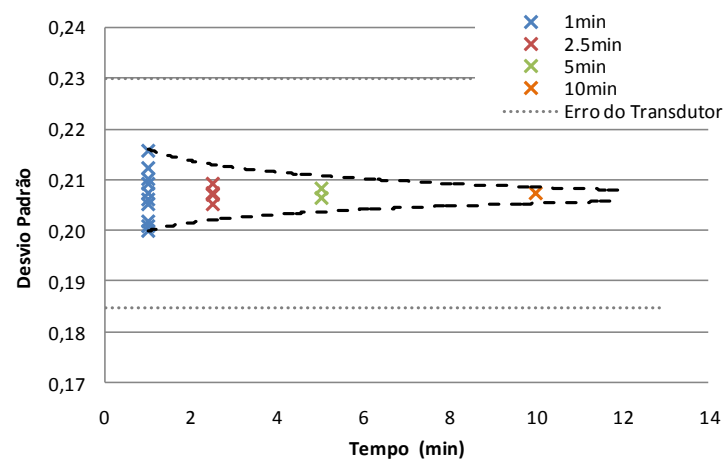


Figura 29 – Avaliação do tempo de coleta de dados. Os valores de desvio padrão correspondem a $Fr_1 = 14,23 - S = 2$.

Durante os experimentos, foram medidos os valores de pressão instantânea através de 11 transdutores de pressão, com 75 mm de distância entre si, dispostos longitudinalmente no fundo do canal, conforme esquema da Figura 30. A primeira

tomada de medição localizava-se exatamente abaixo do bocal, determinando a posição zero ($y = 0,0$).

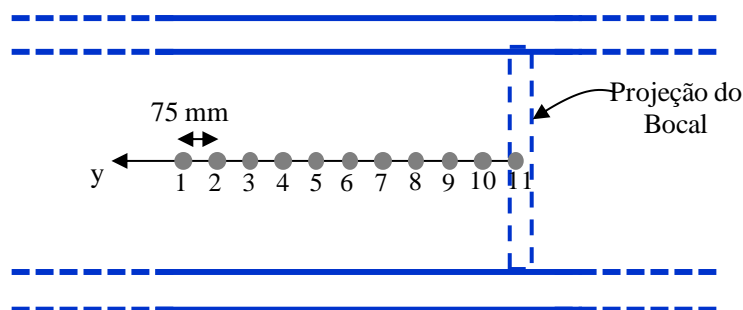


Figura 30 – Esquema da porção instrumentalizada do canal.

Os transdutores utilizados foram da marca *Sitron* SP96 e trabalhavam na faixa de pressão de acordo com os grupos: (-1,53 a +1,53 m.c.a), (-1,5 a 3 m.c.a) e (-0,5 a +1,5 m.c.a), possuindo erro de até 0,5% do fundo de escala. Isto é, para o grupo de transdutores utilizados o erro máximo é de $\pm 2,25$ cm.

A placa de aquisição de dados da marca *National Instruments*, com uma resolução de 16 bits e 80 canais de entrada, ligada a um computador com software *LabViewSignal Express*, realizava conversão do sinal, de tensão elétrica para metros de coluna de água (m.c.a), partir da calibração prévia.

As medições foram realizadas para cinco (5) vazões, garantidas pelo sistema de bombeamento, com controle visual no medidor de vazão eletromagnético. Para cada vazão, associou-se quatro (4) espessuras de colchão d'água. O controle deste nível foi feito através de uma comporta ao final do canal e a linha d'água medida por um piezômetro com tomada no fundo do canal.

A definição das 4 espessuras do colchão d'água foi de acordo com o grau de submergência. Este grau corresponde à razão entre a espessura do colchão (h) e a altura conjugada lenta do ressalto hidráulico (h_2). A lâmina d'água equivalente a esta situação foi obtida visualmente, segundo a posição da seção do fluxo supercrítico. Tal seção, supercrítica, deveria estar posicionada imediatamente a jusante do local de incidência do jato. O resumo das condições de ensaio são contempladas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características dos ensaios realizados.

Vazão (l/s)	Espessura do colchão d'água (h) (m)	Altura conjugada lenta (h_2) (m)	S	Fr_1	Nq	Re_b	We_b
50,0	0,37	0,246	1,5	14,23	9,5E-03	1,25E+05	4,63E+02
	0,49		2		2,0E-02		
	0,62		2,5		5,7E-02		
42,7	0,21	0,209	1	12,12	3,2E-03	1,07E+05	3,95E+02
	0,31		1,5		5,2E-03		
	0,42		2		9,2E-03		
	0,52		2,5		1,9E-02		
36,6	0,18	0,178	1	10,35	2,1E-03	0,91E+05	3,39E+02
	0,27		1,5		3,1E-03		
	0,36		2		4,7E-03		
	0,44		2,5		7,9E-03		
30,0	0,15	0,145	1	8,51	1,2E-03	0,75E+05	2,78E+02
	0,22		1,5		1,7E-03		
	0,29		2		2,3E-03		
	0,36		2,5		3,3E-03		
25,0	0	0,120	0	7,12	7,8E-04	0,62E+05	2,31E+02
	0,12		1		9,8E-04		
	0,18		1,5		1,3E-03		
	0,24		2		1,7E-03		
	0,3		2,5		7,8E-04		

É importante ressaltar que os transdutores de pressão foram submetidos, previamente à execução dos ensaios, a um processo de calibração realizado pela equipe do LOH/IPH/UFRGS. O processo de calibração consistia na variação dos níveis de água (conhecidos) no interior do modelo. A cada nível estático, foi realizado a medição de tensão (Volts) durante 1 minuto. Sabendo-se o nível de água (m), relacionava-se este com a tensão identificada e, então, gerava-se uma curva de calibração coluna de água (m) x tensão (volts).

4.2 METODOLOGIA DE ANÁLISE

A proposta deste trabalho, de caracterizar o escoamento provocado pela incidência de um jato vertical, foi pautada na avaliação das características médias e flutuantes das pressões atuantes no fundo do canal dos coeficientes de assimetria e curtose, na obtenção de um coeficiente estatístico adequado à distribuição de probabilidade que a

amostra parecia seguir, na avaliação do espectro de energia e, também, na utilização de números adimensionais.

4.2.1 Avaliação do comprimento do núcleo (x_c) e do comprimento do jato submerso (x_k)

O núcleo do jato é a massa de água do jato, sem aeração. A avaliação deste comprimento é baseada nas seguintes proposições:

- Horeni (1956):

O comprimento do núcleo do jato é igual a $6.q^{0,32}$

- Irvine et. al. (1997):

O núcleo do jato desaparece por cisalhamento a uma distância de 4 a 6 vezes a menor dimensão do jato.

- Hartung & Häusler (1973):

O comprimento do núcleo é da ordem de 5 vezes a largura do jato.

- Castillo (2002):

O núcleo é completamente desintegrado a uma profundidade 4 vezes a espessura do jato no momento do impacto.

Já a avaliação do comprimento do jato submerso (x_k) é realizada por meio das proposições de Cola (1966) e de Martins e Viseu (1994). O primeiro aponta que o comprimento do jato submerso é igual a 8 vezes o comprimento do núcleo. Os últimos recomendam a espessura mínima do colchão d'água para amortecimento das pressões dinâmicas, 14 vezes a espessura mínima do jato, ou, ainda, 1,5 vezes a altura crítica do escoamento.

4.2.2 Análise da pressão média

A análise da pressão média (P_m) e da pressão dinâmica (P_d) em m.c.a foi realizada através dos dados “instantâneos” obtidos de cada transdutor de pressão. A determinação da distribuição da pressão média é a primeira etapa necessária para a caracterização do campo de pressões oriundo da incidência do jato. Sendo assim, a determinação das pressões traduz a ação do jato sobre o fundo da soleira. Além disso, o conhecimento destes valores será comparado com valores de pressões extremas e servirão de base para a adimensionalização dos resultados.

4.2.3 Análise da Flutuação de pressão

A análise da pressão média é importante para o conhecimento do campo de pressões, oriundo da incidência do jato. Já o desvio padrão da amostra, obtido através da função *desvpad* do Excel, Equação 58, é um dado importante para a previsão das pressões extremas provocadas pelo jato, além de ser utilizado na comparação com as demais bibliografias consultadas.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (P - P_m)^2}{(n - 1)}} \quad \text{Equação 58}$$

Onde

P é a pressão na tomada (m);

P_m é a pressão média da amostra (m);

n é o tamanho da amostra.

4.2.4 Largura de Influência do Jato

Para a definição da zona de impacto do jato, foram analisadas 3 propostas conforme destacado:

- Proposta 1 - baseada em Pinto (1994). O autor aponta que a profundidade para a qual não ocorrem mais pressões dinâmicas determina o comprimento do jato submerso. Desta forma, estendeu-se este conceito para a zona de impacto do jato. A posição (y), para a situação em que a pressão dinâmica apresentasse valor nulo ($P_d=0$), determinaria o valor de b.

- Proposta 2 - A zona de impacto do jato (b) seria definida pela posição (y), em que a pressão dinâmica tivesse o menor valor ($P_{mín}$).
- Proposta 3 - A zona de impacto do jato (b) seria definida a partir da análise do ângulo de espalhamento do jato. A partir das filmagens dos ensaios, selecionaram-se 5 imagens (1 a cada minuto). Esse número está atrelado à quantidade mínima de imagens a serem analisadas para que a média das medidas não fosse alterada. A partir destas imagens, mediu-se, via software AutoCAD, o ângulo de espalhamento do jato. Doravante, por meio de geometria, o valor de b foi determinado.

4.2.5 Coeficiente de Assimetria

A análise do coeficiente de assimetria A_D da amostra de pressões instantâneas mostra a distribuição de valores em torno da média, sendo positiva quando existe uma maior concentração de valores maiores que a média e negativa quando existe uma maior concentração de valores menores que a média.

Além disso, segundo Lopardo (1986), as assimetrias negativas estão associadas com a separação do escoamento dos contornos sólidos. Logo, a identificação da região onde se observa este comportamento tem grande acuidade, já que nessas situações os esforços de subpressões podem ter magnitudes importantes.

O coeficiente de assimetria foi calculado segundo a Equação 59.

$$A_D = \frac{n}{(n-1) \cdot (n-2)} \cdot \sum \left(\frac{P - P_m}{\sigma} \right)^3 \quad \text{Equação 59}$$

Onde:

P é a pressão na tomada (m);

P_m é a pressão média da amostra (m);

σ é o desvio padrão da amostra (m);

n é o tamanho da amostra.

4.2.6 Coeficiente de Curtose

O coeficiente de curtose (A_k) é uma medida de dispersão que caracteriza o "achatamento" da curva da função de distribuição de probabilidade. Valores inferiores a 3 indicam distribuições mais afuniladas (mais altas) e concentradas em torno do valor

médio, quando comparadas com a distribuição Normal. Em oposição, valores superiores a 3 indicam que a função de distribuição de dados é mais achatada e estão menos concentrados em relação à média em comparação com uma distribuição do tipo Normal.

$$A_k = \left\{ \frac{n \cdot (n + 1)}{(n - 1) \cdot (n - 2) \cdot (n - 3)} \cdot \sum \left(\frac{P - P_m}{\sigma} \right)^4 \right\} - \frac{3 \cdot (n - 1)^2}{(n - 2) \cdot (n - 3)} \quad \text{Equação 60}$$

Onde

P é a pressão na tomada (m);

P_m é a pressão média da amostra (m);

σ é o desvio padrão da amostra (m);

n é o tamanho da amostra.

4.2.7 Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidades (N)

Para complementar as análises da pressão média das suas flutuações e dos momentos estatísticos apontados, a avaliação das pressões com diferentes probabilidades de ocorrência, atreladas a um coeficiente de distribuição de probabilidades, permitiu a elaboração de uma metodologia para estimar os valores de pressões extremas.

As solicitações extremas podem ser avaliadas a partir da análise de pressões extremas máximas ($P_{99\%}$ e $P_{99,9\%}$) e das pressões extremas mínimas ($P_{0,01\%}$ e $P_{0,1\%}$), conforme sugestão de Lopardo (1986) Marques et. al. (1996) e Teixeira (2003). Os autores afirmam que é possível estimar os esforços com certa probabilidade de ocorrência $P_{x\%}$ a partir da pressão média e da flutuação de pressão – desvio padrão – de acordo com a Equação 61.

$$P_{x\%} = P_m \pm N \cdot \sigma \quad \text{Equação 61}$$

Onde:

$P_{x\%}$ é a probabilidade de ocorrência (m);

P_m é a pressão média (m);

N é o coeficiente estatístico, função da lei de distribuição de probabilidades a que a amostra possa ser ajustada adequadamente;

σ é o desvio padrão da amostra (m).

4.2.8 Análise de Frequências

A determinação dos diagramas de densidade espectral foi conduzida a partir das amostras temporais de pressão coletadas longitudinalmente ao fundo do canal. Foi utilizado o pacote de processamento de sinais do software MATLAB, pela rotina PWELCH, utilizando a janela de Hanning, contendo 512 pontos, totalizando 150 blocos, com superposição de 50%. Esses parâmetros foram adotados em função da suposição de existirem periodicidades com frequências dominantes menores que 20 Hz no sinal medido, mais especificamente entre 1 Hz e 6 Hz. Portanto, por se tratar de frequências próximas, a resolução proporcionada por um número menor do que com blocos de 512 pontos poderia não revelar algum aspecto importante das flutuações de pressão. Bollaert (2002) complementa, ainda, que a maioria dos fenômenos hidráulicos em bacias e jatos permite ignorar frequências mais altas, da ordem de 25 Hz.

Não foram aplicados filtros aos dados medidos, permitindo a identificação de eventuais efeitos de mais alta frequência.

A análise espectral realizada permite, ainda, associar o tamanho dos vórtices do escoamento a um número de onda (f), obtido a partir do decaimento do espectro. Heisenberg²⁷ (1948 apud Möller e Silvestrini, 2004) assume como hipótese que os efeitos dos vórtices com números de onda maiores que um certo número de onda f , absorvem a energia dos vórtices com número de onda menor do que f . Na Figura 31 está relacionada a energia do espectro em função do número de onda e as regiões de decaimento de energia.

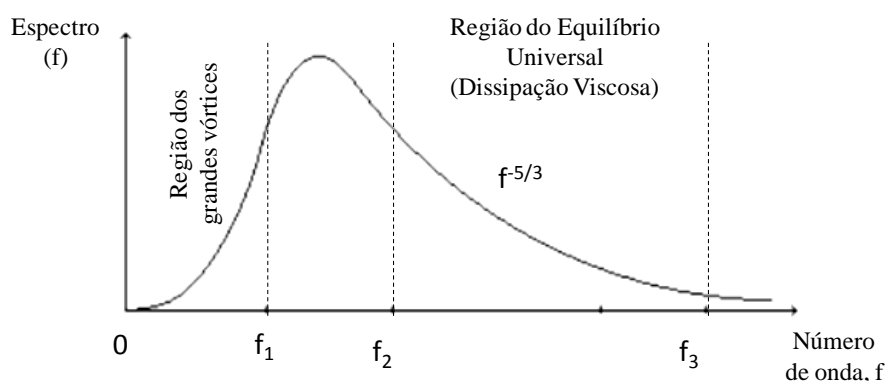


Figura 31 – Espectro em função do número de onda.

(FONTE: adaptado de GOLDSTEIN, 1983).

²⁷ HEISENBERG, W., 1948. Zur statistischen theorie der turbulenz, Zeitschrift für physik, vol. 124, 628.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A apresentação dos resultados se dá, primeiramente, pela análise do comprimento do núcleo (x_c) e do comprimento do jato submerso (x_k). Na sequência é realizada a caracterização das pressões e das flutuações de pressão ao longo do canal e a análise da largura de influência do jato.

Compõe a análise do ponto de impacto o coeficiente de pressão (C_p), a razão entre a pressão dinâmica máxima ($P_{dm\acute{a}x}$) e a energia máxima ($E_{m\acute{a}x}$) em função da razão entre a espessura do colchão d'água (h) e a altura crítica do escoamento (h_{cr}). Também a avaliação do coeficiente de flutuação de pressão (C_p'). Propõem-se a adoção de uma curva de ajuste para a obtenção do coeficiente estatístico de probabilidades (N) associada a diferentes probabilidades de ocorrência. E faz-se o estudo da distribuição de flutuações em frequência.

Compõem a análise a jusante do ponto de impacto a avaliação do coeficiente de pressão (C_p), do coeficiente adimensional de flutuação de pressão (C_p'), da distribuição dos coeficientes de assimetria (A_D) e de curtose (A_K), assim como a distribuição do coeficiente de probabilidade (N). Para completar, faz-se a análise do espectro de frequências de duas tomadas, a primeira após o impacto (tomada 10) e a última tomada (tomada 1), mais afastada do impacto.

Ao final do capítulo faz-se uma avaliação do escoamento sob a perspectiva dos adimensionais utilizados no estudo de ressaltos hidráulicos em bacias de dissipação.

5.1 COMPRIMENTO DO NÚCLEO DO JATO (X_C) E COMPRIMENTO DO JATO SUBMERSO (X_K)

Conforme abordado no capítulo 3, item 3.2.3, página 44, Revisão bibliográfica, entende-se por núcleo do jato a massa compacta de água, sem aeração. À medida que o ar vai se incorporando ao escoamento, a compacidade vai sendo quebrada. A distância entre o lançamento e o ponto da completa aeração do jato é denominada comprimento do núcleo ou, ainda, comprimento de quebra do jato (x_c). Na Tabela 4 estão apresentados os comprimentos do núcleo do jato segundo os autores citados na revisão bibliográfica.

Tabela 4 – Comprimento do núcleo do jato.

Ervine et. al. (1997) “O núcleo do jato desaparece por cisalhamento a uma distância de 4 a 6 vezes a menor dimensão do jato.”	Castillo (2002) “O núcleo é completamente desintegrado a uma profundidade de 4 vezes a espessura do jato no momento do impacto”.	Hartung e Hausler (1973) “O comprimento do núcleo é da ordem de 5 vezes a largura do jato”.	Horeni (1956) “O comprimento do núcleo é igual a $6q^{0,32}$ ”.
0,100 m (1)	0,100 m	2,000 m (3)	3,08 m ($Fr_1 = 14,23$)
0,150 m (2)	-	0,125 m (4)	2,93 m ($Fr_1 = 12,12$)
-	-	-	2,79 m ($Fr_1 = 10,35$)
-	-	-	2,62 m ($Fr_1 = 8,51$)
-	-	-	2,47 m ($Fr_1 = 7,12$)

(1) Utilizando $4B_t$.

(2) Utilizando $6B_t$.

(3) Utilizando $5B$

(4) Utilizando $5B_t$

Os resultados obtidos a partir das equações propostas por Ervine et al (1997), Castillo (2002) e Hartung e Hausler (1973) foram obtidos em modelos reduzidos e apresentaram a mesma ordem de grandeza para o comprimento do núcleo. Há que se destacar que nenhuma das propostas calcula o comprimento x_c em função da energia do jato no lançamento, apenas, indiretamente, em função da vazão que, ao aumentar a espessura do jato, aumenta-se a vazão e/ou carga.

Ao utilizar a equação sugerida por Horeni (1956), os valores para o comprimento do núcleo do jato foram muito superiores aos demais. Isso pode ser explicado pelo fato da equação ser obtida a partir de dados de protótipo. Ademais, o procedimento estabelece que, para o cálculo do comprimento do núcleo do jato, seja utilizada a vazão específica.

Outro fator importante na caracterização do jato, conforme a bibliografia, é a intensidade de turbulência. Contudo, nenhuma das formulações introduz tal variável como parâmetro para o cálculo de x_c .

Referir-se ao comprimento do jato submerso (x_k) é o mesmo que identificar a profundidade para a qual o jato não provoca mais pressões dinâmicas no fundo da bacia. Cola (1965) e Martins e Viseu (1994) foram os pesquisadores que propuseram uma equação para o cálculo de x_k e uma espessura mínima para o colchão d'água, respectivamente.

A Tabela 5 apresenta a espessura do colchão d'água (h) correspondente às submergências testadas e o comprimento do jato submerso (x_k) às respectivas vazões. Destaca-se que todas as submergências testadas implicaram em comprimentos (x_k), de acordo com Cola (1965), maiores que a espessura do colchão d'água. Isto significa que, em todos os casos, o colchão d'água foi incapaz de absorver as pressões dinâmicas provocadas pelo jato.

Tabela 5 – Espessura do colchão d'água(h) e comprimento do jato submerso (x_k), segundo Cola (1965).

Fr_1	$S_1 - h$ (m)	$S_{1,5} - h$ (m)	$S_2 - h$ (m)	$S_{2,5} - h$ (m)		Comprimento do jato submerso segundo Cola (1965) Jatos Retangulares $x_k=8x_c$
14,23	x	0,369	0,493	0,616	-	16 m ⁽¹⁾
12,12	0,209	0,314	0,419	0,524		1 m ⁽²⁾
10,35	0,178	0,266	0,355	0,444		0,8 m ⁽³⁾
8,51	0,145	0,218	0,291	0,363		1,2 m ⁽⁴⁾
7,12	0,120	0,180	0,240	0,300		-

⁽¹⁾ Utilizando como x_c a proposta de Hartung e Hausler (1973) onde, segundo os autores, o comprimento do núcleo (x_c) é 5 vezes a largura do jato ($B = 0,4m$).

⁽²⁾ Utilizando como x_c a proposta de Hartung e Hausler (1973), contudo, utilizando a espessura do jato ($B_i=0,025m$).

⁽³⁾ Utilizando como x_c a proposta de Ervine et. al. 1997, onde o núcleo do jato desaparece por cisalhamento a uma distância de 4 a 6 vezes a menor dimensão do jato, ($4x_c$).

⁽⁴⁾ Utilizando como x_c a proposta de Ervine et. al. 1997, onde o núcleo do jato desaparece por cisalhamento a uma distância de 4 a 6 vezes a menor dimensão do jato, ($6x_c$).

Martins e Viseu (1994) propõem espessuras mínimas para o colchão d'água. Os pesquisadores sugerem que a espessura mínima do colchão d'água seja 14 vezes a espessura mínima do jato ou, alternativamente, 1,5 vezes a altura crítica do escoamento. A Tabela 6 contempla os resultados. Os valores sublinhados atendem ao primeiro critério, já ao segundo critério, nenhum dos ensaios atende a espessura mínima calculada.

Tabela 6 – Espessura do colchão d'água (h) para os ensaios que correspondem à submergência 1

Fr_1	$S_1 - h$ (m)	$S_{1,5} - h$ (m)	$S_2 - h$ (m)	$S_{2,5} - h$ (m)	h_{cr}	$14 \cdot B_t$ ou, $1,5 h_{cr}$
						$0,35^{(1)}$
14,23	x	<u>0,369</u>	<u>0,493</u>	<u>0,616</u>	<u>0,467</u>	$0,701^{(2)}$
12,12	0,209	0,314	<u>0,419</u>	<u>0,524</u>	<u>0,412</u>	$0,631^{(2)}$
10,35	0,178	0,266	<u>0,355</u>	<u>0,444</u>	<u>0,379</u>	$0,569^{(2)}$
8,51	0,145	0,218	0,291	<u>0,363</u>	0,332	$0,499^{(2)}$
7,12	0,120	0,180	0,240	0,300	0,294	$0,441^{(2)}$

⁽¹⁾ 14 vezes a espessura do jato (0,025m).

⁽²⁾ $1,5 h_{cr}$

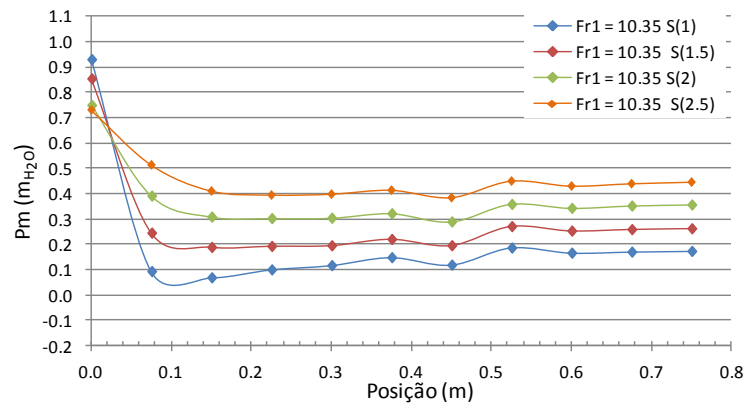
5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PRESSÕES MÉDIAS E PRESSÕES DINÂMICAS AO LONGO DO EIXO DE MEDIÇÃO

Os dados de pressão média foram obtidos a partir da média dos dados instantâneos de cada transdutor. A determinação da pressão média e da pressão dinâmica é a primeira etapa para a caracterização do campo de pressões que ocorre junto ao fundo.

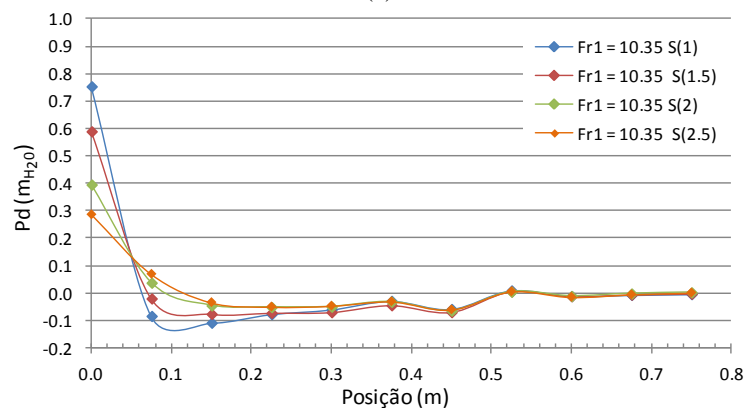
Por meio da Figura 32, pode ser visualizado o comportamento da pressão média (a) e da pressão média dinâmica (b) obtidas no eixo central do canal, para $Fr_1 = 10,35$. As demais situações de ensaio podem ser conferidas por meio dos gráficos do capítulo 9, item 9.1, na página 158.

A análise das pressões médias e dinâmicas permite verificar que no ponto de estagnação, posição zero ($y = 0$), ocorre o valor máximo da pressão para, logo nas tomadas adjacentes, caírem rapidamente. Outra observação importante é a diminuição da pressão no ponto de impacto, com o aumento do colchão d'água, mais claro nos gráficos da pressão dinâmica (b).

Além disso, há que se notar que as pressões médias dinâmicas tendem a zero em torno da posição $y = 0,5$ m, independente do número de Froude (Fr_1).



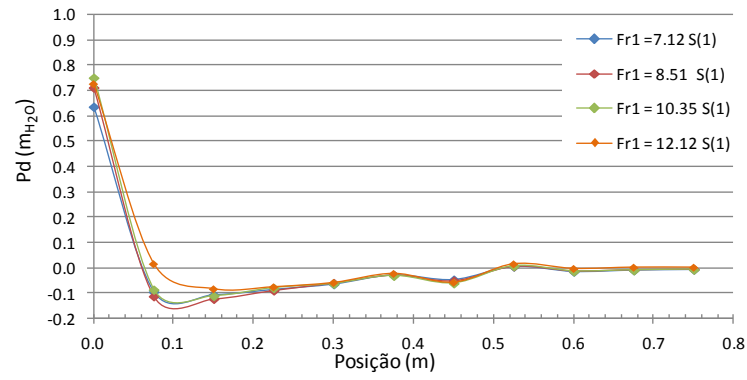
(a)



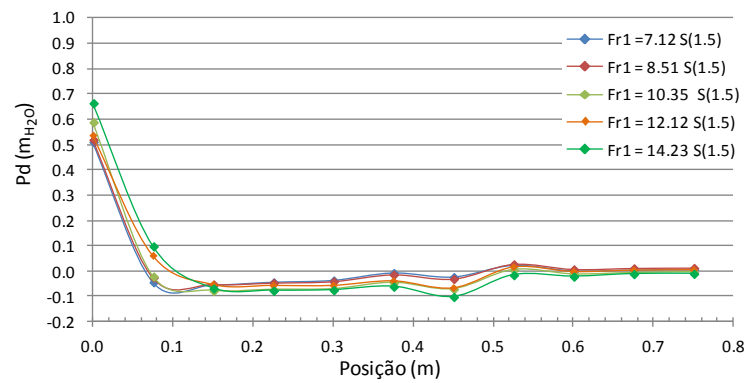
(b)

Figura 32 – Comportamento da pressão para $Fr_1 = 10,35$: (a) pressões médias (b) pressões média dinâmicas.

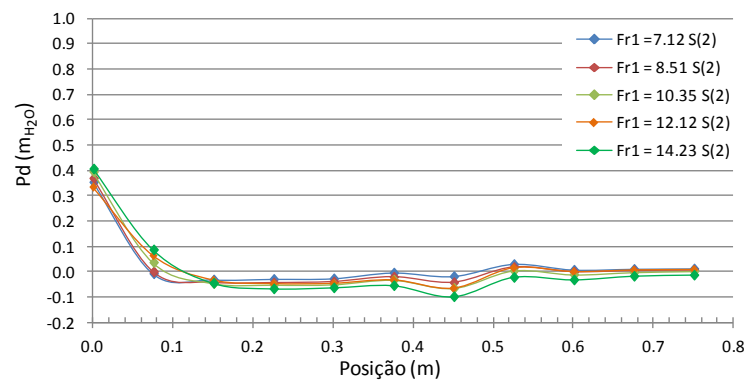
Na Figura 33, as situações de ensaio são agrupadas por grau de submersão. A análise do conjunto permite identificar que as pressões no ponto de impacto são atenuadas em 60%, em média, quando a comparação é realizada entre o grau mínimo de submersão ($S = 1$) e o grau máximo ($S = 2,5$). Há de se destacar que, com o aumento da submersão, as tomadas adjacentes à tomada central registram pressões dinâmicas mais elevadas do que submersões menores, ou seja, o aumento da espessura do colchão d'água atenua as pressões, mas também provoca o aumento da região com pressões dinâmicas mais elevadas. Isso ocorre devido à maior dispersão do jato no interior da massa de água, Figura 34.



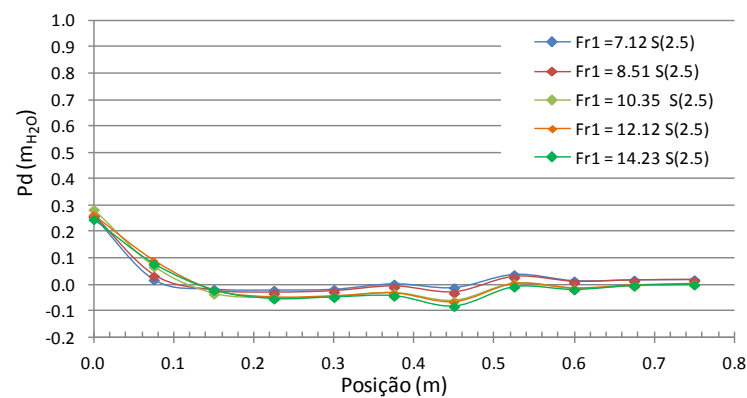
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 33 – Pressões médias dinâmicas: (a) submersão 1; (b) submersão 1,5; (c) submersão 2 e (d) submersão 2,5.

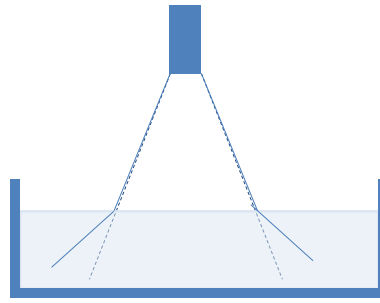


Figura 34 - Aumento do ângulo de espalhamento no momento em que o jato entra na massa de água.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO AO LONGO DO EIXO DE MEDIÇÃO

As intensas flutuações de pressão próximas ao ponto de impacto do jato, bem como a incorporação de ar e a consequente agitação no nível d'água, fazem com que se desenvolva intensa turbulência. Da perspectiva da dissipação de energia, tem-se uma maneira bastante eficiente no processo de dissipação, já para às questões estruturais e geológicas do local de impacto, cuidados redobrados são exigidos. Portanto, a caracterização das flutuações de pressão tem valor relevante para o dimensionamento das obras hidráulicas envolvidas neste processo.

Na Figura 35, está apresentado o comportamento das flutuações de pressão para $Fr_1 = 10,35$. As demais situações podem ser conferidas no capítulo 9, item 9.2, página 160.

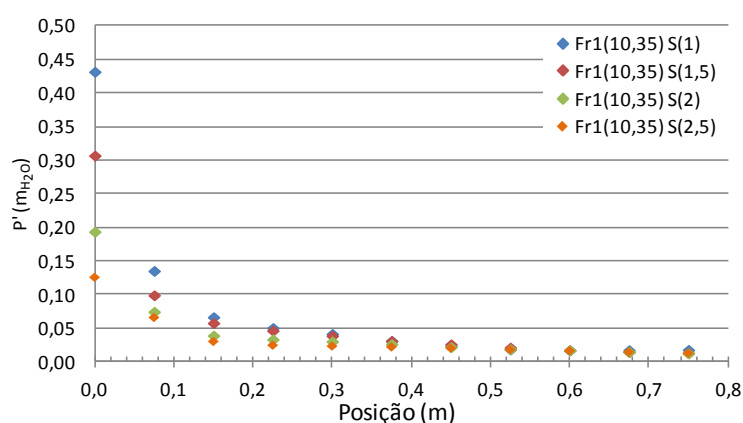


Figura 35 – Comportamento da flutuação de pressão para $Fr_1 = 10,35$.

As maiores flutuações de pressão ocorrem no ponto de impacto do jato e dependem do número de Froude (Fr_1). A magnitude das flutuações, no ponto de impacto, é

inversamente proporcional à espessura do colchão d'água (h). Verifica-se, ainda, que suas magnitudes diminuem consideravelmente já na segunda tomada de medição (0,075 m afastada da tomada central). A partir da distância 0,5 m, as flutuações tendem a zero para todas as situações de ensaio. É nesta posição, também, onde apenas as pressões devidas ao colchão d'água passam a atuar no fundo do canal.

5.4 LARGURA DE INFLUÊNCIA DO JATO

Para a definição da zona de impacto do jato, analisaram-se 3 propostas conforme a metodologia já apresentada.

A fim de definir a melhor proposta, por meio da metodologia de análise exposta, calculou-se o comprimento da zona de impacto (b) de acordo com as propostas 1, 2 e 3. Para a avaliação da sugestão de Beltaos (1976), utilizou-se a igualdade $(P - P_{\min}) = 0,5(P_{\max} - P_{\min})$, à exceção do ensaio identificado por $Fr_1 = 7,12$ e grau de submergência 2,5, o qual não apresentou valores negativos. Os resultados podem ser conferidos na Tabela 7.

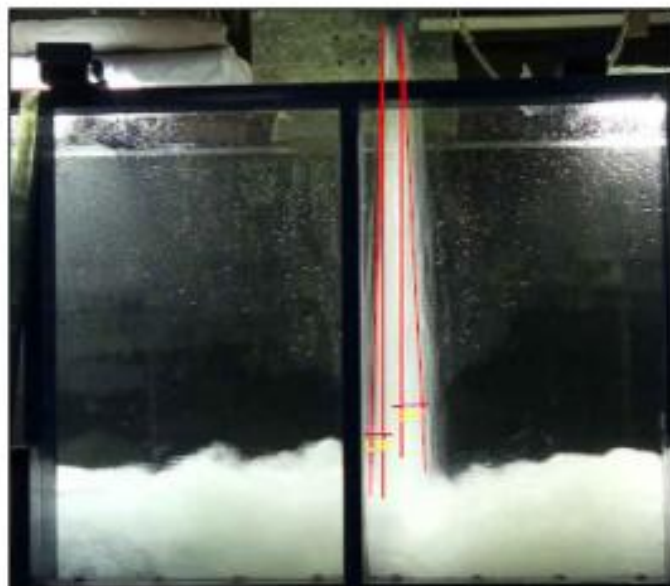


Figura 36 - Medição do ângulo de espalhamento para $Fr_1 = 10,35$.

Tabela 7 – Comprimento da zona de impacto ($b/(H-h)$) calculada pelas diferentes propostas.

Ensaio	Proposta 1		Proposta 2		Proposta 3	
	b (m)	$b/(H-h)$	b (m)	$b/(H-h)$	b (m)	$b/(H-h)$
$Fr_1 = 7,12$ (S1)	0,15	0,190	0,110	0,138	0,054	0,067
$Fr_1 = 7,12$ (S1,5)	0,13	0,178	0,112	0,151		0,073
$Fr_1 = 7,12$ (S2)	0,15	0,215	0,112	0,165		0,079
$Fr_1 = 7,12$ (S2,5)	0,18	0,284	0,340	0,548		0,087
$Fr_1 = 8,51$ (S1)	0,10	0,134	0,200	0,258	0,063	0,081
$Fr_1 = 8,51$ (S1,5)	0,11	0,154	0,220	0,313		0,090
$Fr_1 = 8,51$ (S2)	0,11	0,175	0,220	0,350		0,100
$Fr_1 = 8,51$ (S2,5)	0,20	0,359	0,360	0,646		0,113
$Fr_1 = 10,35$ (S1)	0,13	0,170	0,200	0,270	0,067	0,090
$Fr_1 = 10,35$ (S1,5)	0,14	0,216	0,220	0,336		0,102
$Fr_1 = 10,35$ (S2)	0,18	0,319	0,420	0,743		0,118
$Fr_1 = 10,35$ (S2,5)	0,23	0,475	0,420	0,882		0,140
$Fr_1 = 12,12$ (S1)	0,15	0,208	0,340	0,478	0,073	0,102
$Fr_1 = 12,12$ (S1,5)	0,19	0,307	0,340	0,561		0,120
$Fr_1 = 12,12$ (S2)	0,22	0,439	0,460	0,918		0,145
$Fr_1 = 12,12$ (S2,5)	0,26	0,657	0,460	1,162		0,184

Para a comparação dos resultados, utilizou-se o coeficiente de Pressão (C_p), expressos pela Equação 50, e pelo adimensional expresso pela Equação 62.

$$\frac{b}{(H - h)}$$

Equação 62

Onde:

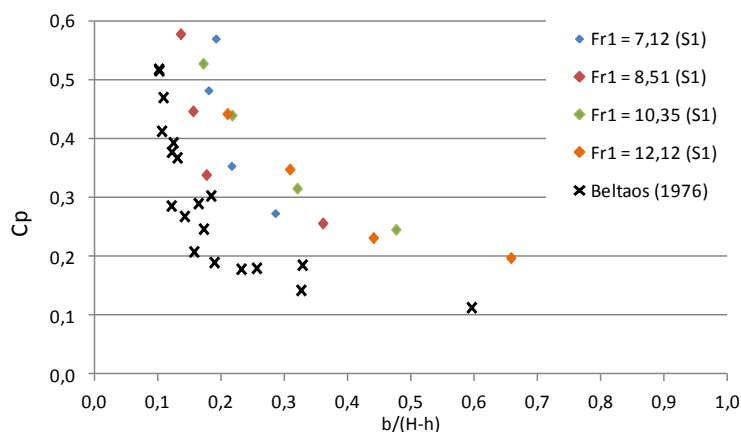
b é a largura de influência do jato (m);

H é a distância vertical entre o bocal e o fundo do canal (m);

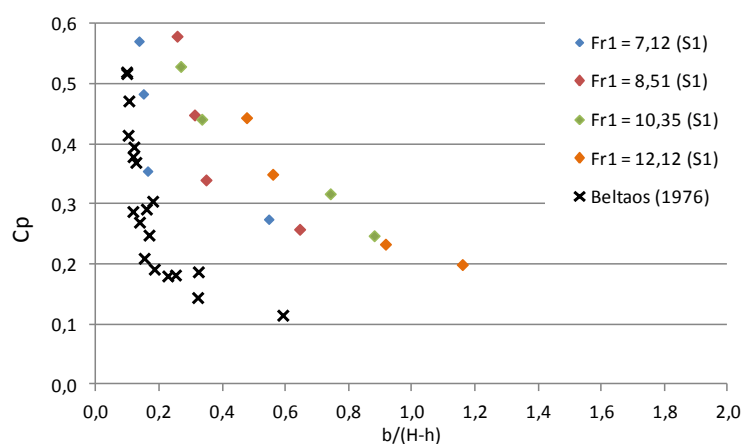
h é a espessura do colchão d'água (m).

Para o cálculo da pressão máxima, quando não se dispõe de medidas, é indicada a proposta de Castillo (2002). O autor estudou as pressões provocadas por um jato vertical na zona de impacto com diferentes aparelhos de medição, diferentes configurações de ar/água (ar/ar, água/ar e água/água) e apresentou uma formulação geral representada pela Equação 38 e Equação 39, página 63. Para maiores informações, recomenda-se a leitura do trabalho do autor.

Na Figura 37a são mostrados os resultados obtidos com a proposta 1 e, na Figura 37b, os resultados com a proposta 2, e, após, comparados com a recomendação de Beltaos (1976). O resultado permite identificar que as propostas apresentaram comportamento similar. Nota-se que à medida que aumenta a submergência, aumenta a razão $b/(H-h)$ e diminui a pressão dinâmica máxima ($P_{dm\acute{a}x}$). Isso pode ser explicado segundo o ângulo de espalhamento do jato. Quando o jato adentra o colchão de água, o ângulo de espalhamento aumenta, aumentando, assim, a zona de impacto, conforme a situação apresentada na Figura 34. No entanto, deve-se atentar que, mesmo que a zona de impacto aumente, as pressões dinâmicas são atenuadas pelo colchão. Tal proposição é mais conservadora que a de Beltaos (1976).



(a) Proposta 1.



(b) Proposta 2.

Figura 37 - Comparação entre os adimensionais obtidos com as propostas 1 e 2 e com a indicação de Beltaos (1976).

Na Tabela 8, são revelados os valores dos ângulos obtidos para as 5 imagens, bem como a média final. Na Figura 38, são apresentados os resultados utilizando as medições do

ângulo de espalhamento do jato na saída do bocal. Na imagem, é possível identificar que os resultados estão de acordo com a proposta de Beltaos (1976). Conforme já mencionado, o ângulo de espalhamento aumenta quando o jato adentra o colchão da água, aumentando assim a zona de impacto. Da mesma forma que as propostas 1 e 2, a utilização deste resultado é limitada ao comprimento do jato submerso. Se o comprimento do jato submerso for menor que a espessura do colchão d'água, não existe razão para o cálculo da zona de impacto, já que as pressões dinâmicas e flutuações de pressão não alcançarão o fundo do canal.

Tabela 8 – Ângulo de espalhamento para $Fr_1 = 10,35$.

T (min)	Ângulo Esq (°)	Ângulo Dir (°)
1	1,72	3,11
2	1,04	2,40
3	2,06	2,90
4	1,21	2,64
5	1,32	2,40
Média	1,47	2,69
φ (rad)	0,0257	0,0469
b(m)	0,09	

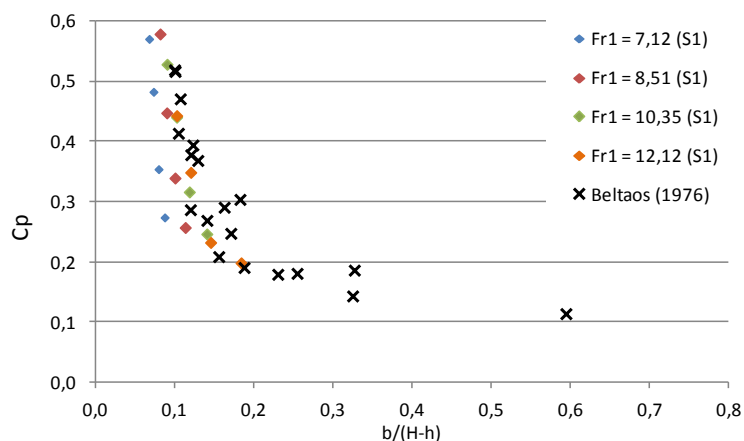


Figura 38 – Comparação dos resultados adimensionais obtidos com a propostas 3 e com a indicação de Beltaos (1976).

O terceiro procedimento apontado corrobora as sugestões de Beltaos (1976), no que tange à determinação da zona de impacto do jato. Destarte, para facilitar a utilização dos resultados, indica-se o ajuste, Figura 39, expresso pela Equação 63. Essa formulação foi obtida utilizando o conjunto de resultados (presente estudo e Beltaos, (1976)) aqui comentados.

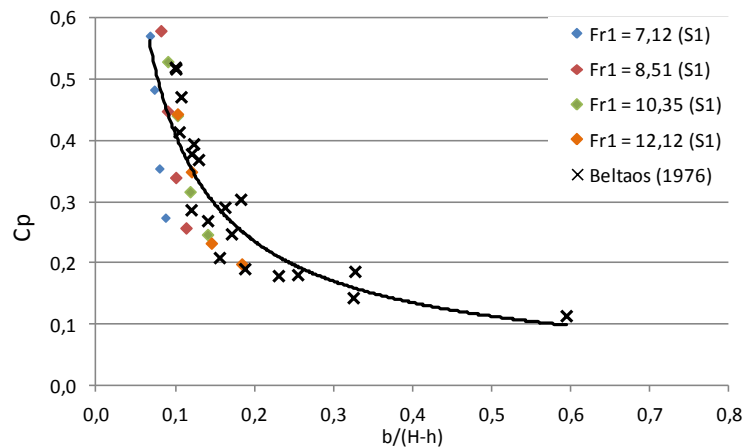


Figura 39 - Resultados adimensionais obtidos com a propostas 3, com a indicação de Beltaos (1976) e o ajuste proposto.

$$\frac{P_{\text{máx}}}{\frac{V_j^2}{2 \cdot g}} = \frac{1}{16} \cdot \left(\frac{b}{H-h} \right)^{-0,8} \quad \text{Equação 63}$$

Ressalta-se que a equação é válida para a faixa de valores $0,1 \leq b/(H-h) \leq 0,6$.

Os resultados permitem concluir que a determinação da zona de impacto em função das pressões dinâmicas com as propostas 1 ($P_d = 0$) e 2 ($P_{\text{mín}}$) obtiveram o mesmo resultado. Tais sugestões se mostram mais conservadoras que a recomendada por Beltaos (1976) e mais conservadoras que a proposta 3. Já a obtenção da zona de impacto através da medição dos ângulos de espalhamento apresentou o mesmo comportamento que a sugestão da bibliografia. Portanto, os resultados confirmam as recomendações de Beltaos (1976).

A fim de promover a utilização dos resultados, aconselha-se o uso da Equação 63 por se ajustar aos dados com um coeficiente de correlação igual a 0,75.

5.5 O PONTO DE IMPACTO DO JATO VERTICAL

5.5.1 O coeficiente de pressão (C_p) no ponto de impacto do jato vertical

Conforme mencionado no Capítulo 3, o coeficiente de pressão ou, ainda, o número de Euler, adimensional importante na hidráulica e, maneira mais usual de apresentar este tipo de resultado, permite analisar e comparar resultados entre os diversos estudos realizados no âmbito do estudos das pressões em dissipadores de energia.

Na Figura 40, é apresentado o comportamento do coeficiente de pressão (C_p), no ponto de impacto do jato, em função da relação entre a espessura do colchão d'água (h) e da espessura do bocal (B_t). É possível identificar um patamar em torno do valor 0,6 até a posição $h/B_t = 5$. Esse patamar corresponde aos valores de pressão respectivos a submergência 0 (zero)²⁸ e 1, permitindo concluir que não há amortecimento significativo para colchões d'água inferiores à submergência 1. À medida que o colchão da água cresce, o valor de C_p diminui exponencialmente. Este coeficiente foi calculado de acordo com a Equação 50, página 75.

Há que se destacar que, para a submergência 1, trabalhou-se com a pressão média, ou seja, não subtraiu-se a espessura do colchão d'água da pressão medida.

O ajuste proposto é expresso pela Equação 64 e válida para $h/B_t \geq 5$ com $R^2=0,88$.

$$C_p = e^{-0,095 \cdot \frac{h}{B_t}} \quad \text{Equação 64}$$

Onde:

h é a espessura do colchão d'água (m);

B_t é a espessura do jato (m).

²⁸ Trata-se de dados de piezômetros obtidos junto ao acervo de dados do Laboratório de Obras Hidráulicas, no desenvolvimento do P&D Estudo dos processos geomecânicos, provocados por esforços hidrodinâmicos em fossas de erosão a jusante de saltos de esqui, no ano de 2008.

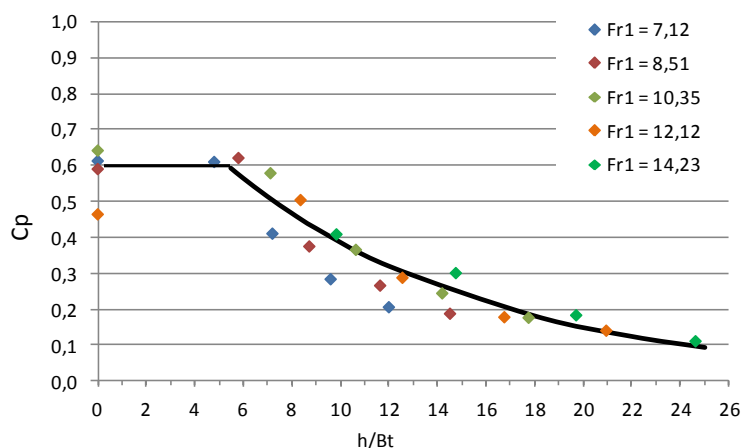


Figura 40 – Coeficiente de pressão dinâmica (C_p) para os dados obtidos na presente pesquisa.

A título de comparação, os resultados obtidos foram adicionados aos resultados agrupados por Castillo (2006), apresentado por meio da Figura 22, na página 77. A Figura 41 expõe o conjunto de dados e permite verificar que os resultados apresentam o mesmo comportamento dos demais autores, notadamente aos dados de Castillo (1989). É importante destacar que o autor realizou ensaios em um modelo reduzido de um vertedouro de uma barragem tipo abóboda com altura de 1,72 m.

É evidente que o aumento da espessura do colchão d'água atenua a pressão no ponto de impacto. Dessa forma, propõe-se determinar o valor máximo da pressão em função da energia máxima inicial e do nível de jusante.

Por meio da Figura 42, verifica-se que, para graus de submergência menores que 1, a dissipação de energia no interior do colchão d'água é a mesma. Neste caso, 40% da energia total é dissipada no núcleo do jato e na queda livre. Vale destacar que por se tratar de um jato experimental, em modelo de laboratório, neste enquadramento, a dissipação pela queda livre é praticamente inexistente, já que não há incorporação de ar significativa.

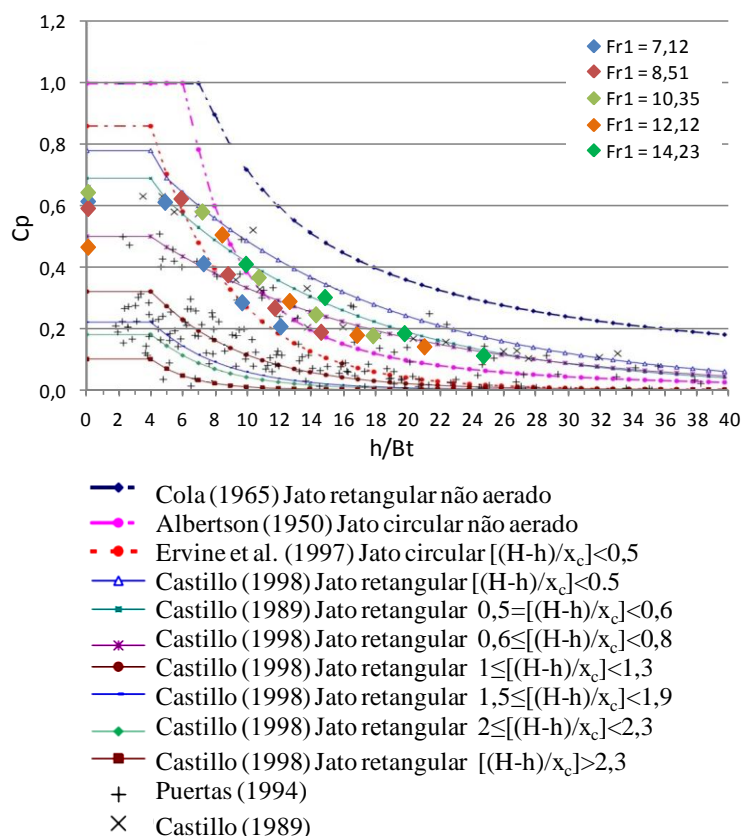


Figura 41 – Comparação entre os resultados da presente pesquisa com os resultados de demais pesquisadores

(adaptado de Castillo, 2006)

À medida que a submersão aumenta, ocorre maior dissipação no colchão d'água e, assim, a pressão no ponto de impacto é atenuada. Na e a curva tende à razão da pressão equivalente a espessura do colchão d'água (h), ou seja, $P_{MÁX}/E_{MÁX}$ tende a $h/E_{MÁX}$. O cálculo da energia máxima ($E_{MÁX}$) foi realizado de acordo com a Equação 65.

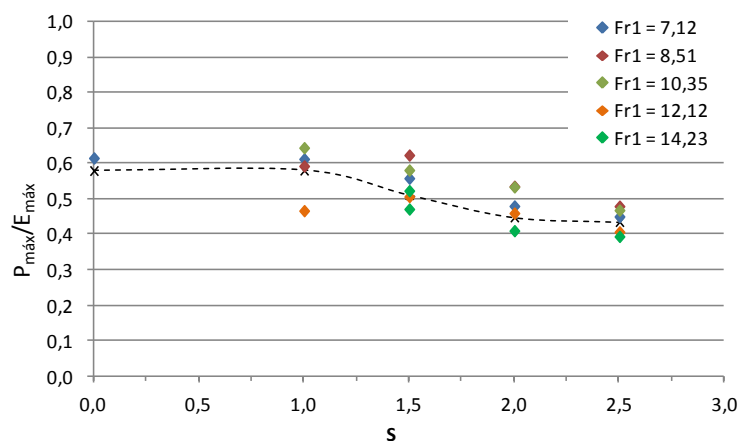


Figura 42 – Relação da pressão máxima com a energia no início do lançamento em função da submersão.

$$E_{M\acute{a}x} = H + \frac{V_b^2}{2 \cdot g} \quad \text{Equação 65}$$

Onde:

H é a distância vertical entre o bocal e o fundo do canal (m);

V_b é a velocidade do escoamento na saída do bocal (m/s);

g é a aceleração da gravidade (m/s²).

Outra forma de apresentar esses resultados decorre da utilização da relação entre a espessura do colchão d'água e da altura crítica do escoamento (h_{cr}). A altura crítica do escoamento toma notado interesse, já que representa a profundidade de escoamento em que a energia específica atinge um valor único e mínimo.

A Figura 43 exhibe o comportamento da pressão média máxima ($P_{m\acute{a}x}$) em relação à energia máxima do jato ($E_{m\acute{a}x}$) e em função da relação entre a espessura do colchão d'água e da profundidade crítica do escoamento. Na Figura 44, exhibe-se os mesmos parâmetros, à exceção do eixo das ordenadas, onde $P_{m\acute{a}x}$ foi substituído pela pressão máxima dinâmica ($P_{dm\acute{a}x}$). Então, conforme as figuras mencionadas, no ponto de impacto do jato, as pressões, ali provocadas, podem ser calculadas pelos ajustes expressos pela Equação 66 e pela Equação 67.

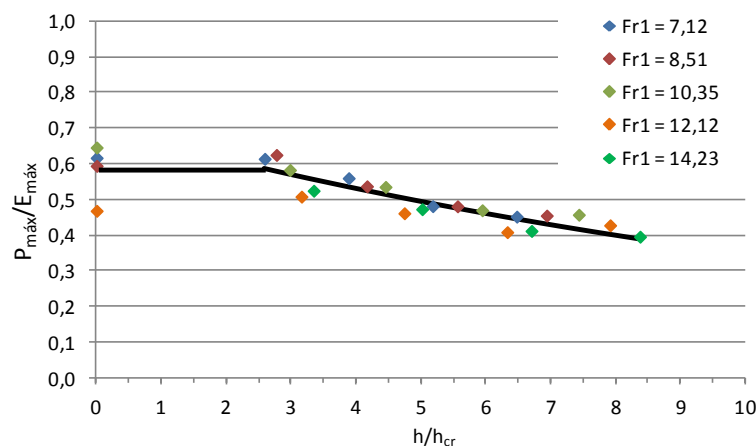


Figura 43 – Relação entre a pressão média máxima ($P_{m\acute{a}x}$) e a energia máxima do jato ($E_{m\acute{a}x}$) em função da relação entre a espessura do colchão d'água (h) e a profundidade crítica do escoamento (h_{cr})

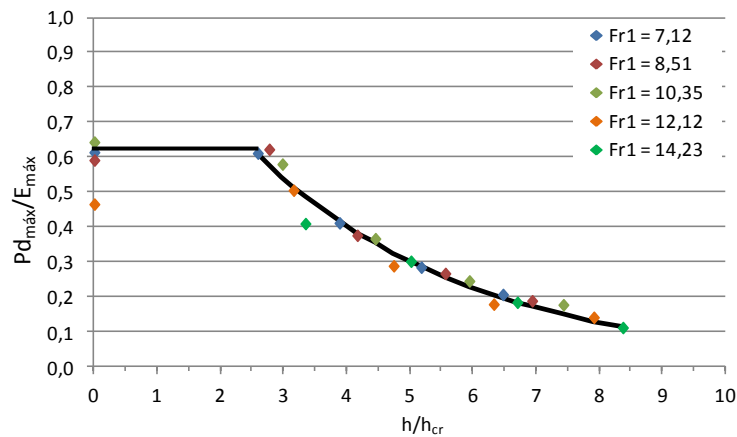


Figura 44 – Relação entre a pressão dinâmica máxima ($P_{dmáx}$) e a energia máxima do jato ($E_{máx}$) em função da relação entre a espessura do colchão d'água (h) e a profundidade crítica do escoamento (h_{cr})

$$\frac{P_{Máx}}{E_{MÁX}} = 0,7 \cdot e^{-0,07 \cdot \frac{h}{h_{cr}}} \therefore R^2 = 0,90 \quad \text{Equação 66}$$

$$\frac{P_{dMáx}}{E_{MÁX}} = 1,29 \cdot e^{-0,3 \cdot \frac{h}{h_{cr}}} \therefore R^2 = 0,98 \quad \text{Equação 67}$$

As equações são válidas para $2,5 \leq \frac{h}{h_{cr}} \leq 9,0$.

5.5.2 O coeficiente de flutuação de pressão (C_p') no ponto de impacto do jato

Por se tratar de um escoamento altamente turbulento e, portanto, de natureza estocástica, a flutuação de pressão vai ao encontro da análise da pressão média. Desta forma, a descrição das pressões só pode ser exitosa empregando a análise estatística. Uma das técnicas empregada é a análise do desvio padrão da amostra de pressões que, conforme pesquisadores já citados, é igual à flutuação das pressões do escoamento.

Na Figura 45, são exibidas as flutuações de pressão, adimensionalizadas segundo a Equação 68, no ponto de impacto do jato em função da espessura do colchão d'água. Verifica-se que as flutuações de pressão diminuem à medida que o colchão aumenta. Segundo Lencastre (1984), que estudou vertedouros de queda livre, o máximo valor do desvio padrão das flutuações de pressão é atingido para profundidades de colchão com cerca de quatro vezes a dimensão transversal do jato retangular. No entanto, haja

ausência de dados para $0 \leq h/B_t \leq 5B_t$, pode-se presumir a existência de um patamar, entre os valores máximos da flutuação, em torno do valor 0,3, até profundidades de colchão com 4,5 vezes B_t . Para $h/B_t \geq 4,5$, as flutuações decaem rapidamente.

$$Cp' = \frac{P'}{\frac{V_j^2}{2 \cdot g}} \quad \text{Equação 68}$$

O ajuste proposto para o comportamento do coeficiente de flutuação (Cp') é expresso pela Equação 69.

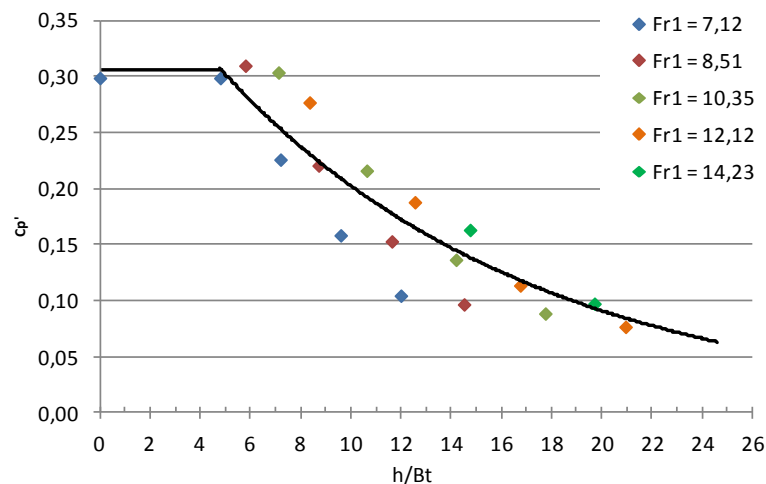


Figura 45 – Flutuação de pressão no ponto de impacto do jato em função da espessura do colchão d'água.

$$Cp' = 0,45 \cdot e^{-0,08 \cdot \frac{h}{B_t}} \therefore R^2 = 0,81 \quad \text{Equação 69}$$

Na Figura 46, os resultados do coeficiente de flutuação obtidos foram comparados aos resultados publicados por vários pesquisadores. Deve-se observar que os diferentes tipos e formato dos jatos influenciam sensivelmente na magnitude das flutuações de pressão. Apesar disso, com parcimônia, pode-se mencionar que os resultados obtidos apresentaram a mesma ordem de grandeza e comportamento semelhante aos demais.

Não obstante, o melhor resultado decorre da comparação com os resultados obtidos por Castillo (1989, 2006) e por Puertas (1994), Figura 47. Os picos de flutuação foram registrados para $0 < h/B_t \leq 10$, com decaimento pronunciado até $h/B_t = 15$. Após, os valores diminuem de forma suave, quando, a partir da relação $h/B_t = 30$, tendem a zero.

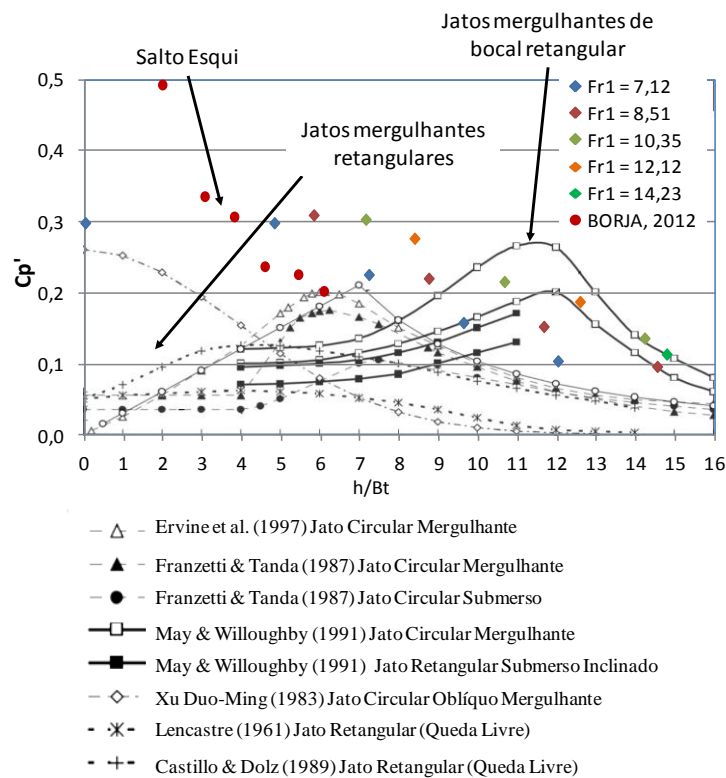


Figura 46 – Coeficientes de flutuação de pressão obtidos por diferentes autores e comparados com os resultados obtidos.

(adaptado BOLLAERT, 2002)

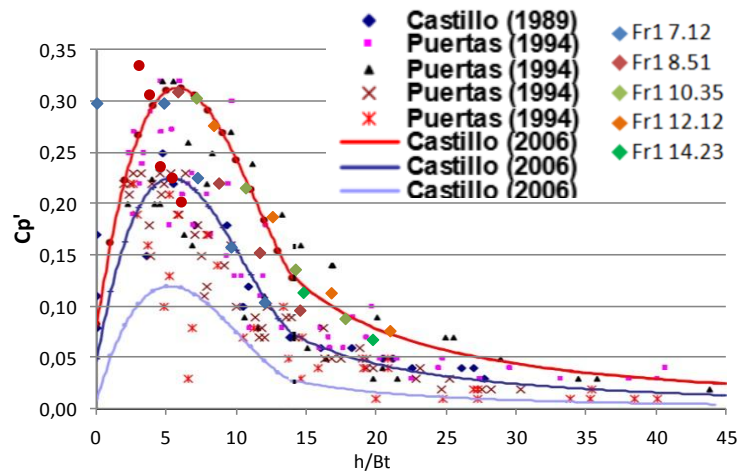


Figura 47 – Comparação entre os coeficientes de flutuação de pressão obtidos por Castillo (1989, 2006) e Puertas (1994) e os coeficientes encontrados no estudo em questão.

(adaptado CASTILLO, 2006)

Do mesmo modo que para a análise das pressões máximas, propõe-se apresentar as flutuações de pressão (P') em função da relação entre a espessura do colchão d'água (h) e da altura crítica do escoamento (h_{cr}), Figura 48. Nesta situação, propõe-se o ajuste expresso pela Equação 70, uma curva exponencial, que descreve a flutuação de pressão em função da relação entre a profundidade do colchão d'água e a altura crítica, válida para $2,5 \leq h/h_{cr} \leq 8,5$ e $R^2=0,99$.

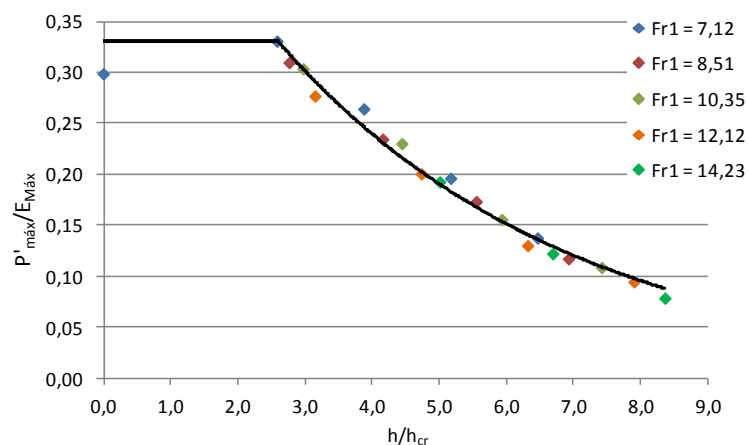


Figura 48 – Relação da flutuação de pressão máxima com a energia máxima no ponto de lançamento do jato em função da relação entre a espessura do colchão d'água e a altura crítica do escoamento.

$$\frac{P'_{máx}}{E_{MÁX}} = 0,6 \cdot e^{-0,23 \cdot \frac{h}{h_{cr}}}$$

Equação 70

5.5.3 O coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades (N) no ponto de impacto do jato

A partir da análise da pressão média e da flutuação de pressão, aliada a um coeficiente, N, Marques et. al (1996), em seus estudos acerca da formação do ressalto hidráulico a jusante de vertedouro, afirmam ser possível estimar os esforços com certa probabilidade de ocorrência a partir da Equação 71.

$$P_{x\%} = P_m \pm N \cdot P' \quad \text{Equação 71}$$

Este coeficiente N é função da lei de distribuição estatística que a amostra parece seguir. Se a amostra é bem representada pela distribuição Normal (Gaussiana), os coeficientes de assimetria e de curtose deverão ser igual à zero. Pela análise da Figura 49, identifica-se que os coeficiente de assimetria diferem de zero, portanto a distribuição normal não é adequada para a avaliação das pressões aqui abordadas. Para as situações em que o grau de submergência é igual à unidade ($S=1$), os coeficientes resultaram em valores negativos. Por outro lado, à medida que a submergência aumenta, os coeficientes de assimetria também aumentam, indicando a prevalência de pressões positivas.

No que corresponde à análise da curtose, para $S > 1$, os dados seguem uma função mais achatada que a normal ($A_k > 0$). Isso significa que é relativamente fácil obter valores que se aproximam da média, mesmo com elevado grau de flutuações de pressão, Figura 50.

De acordo com Manso (2006), o jato tem assimetria negativa e curtose positiva, para o caso de impacto do núcleo do jato na soleira, ou até mesmo, quando há impacto com colchão raso, ou seja, $x_k > h$. Já em condições de impacto do jato desenvolvido, o pesquisador aponta coeficientes de assimetria positivos. O que corrobora os resultados apresentados no item 5.1 página 94.

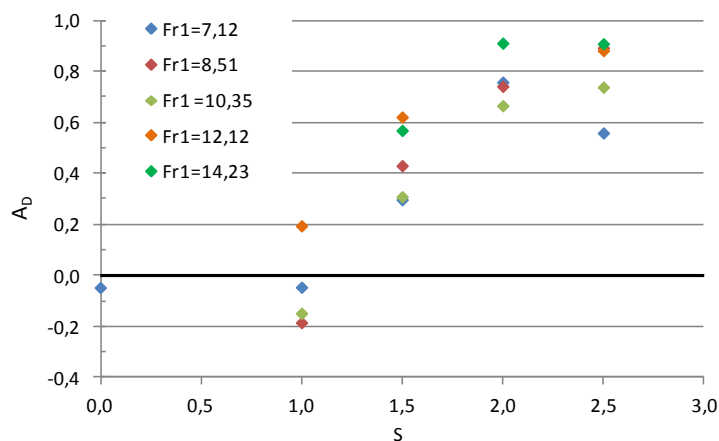


Figura 49 – Coeficiente de assimetria no ponto de impacto do jato em função da submergência.

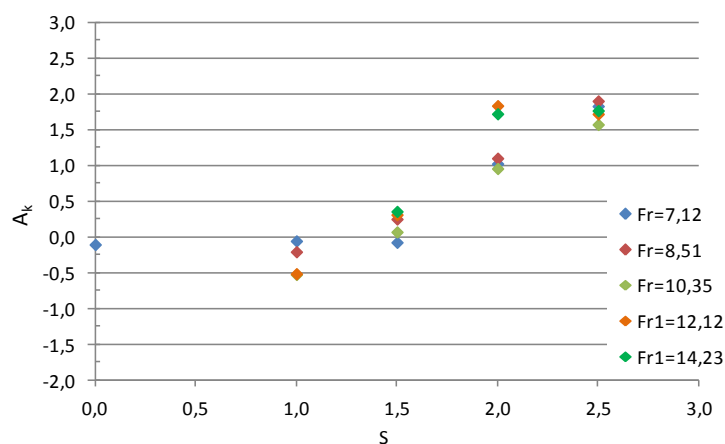


Figura 50 – Coeficiente de curtose no ponto de impacto do jato em função da submergência.

Conforme avaliado, a distribuição de pressões provocadas pelo impacto do jato não segue uma distribuição normal. Dentro disso, a determinação do coeficiente estatístico de distribuição de frequências (N) foi conduzida a partir das pressões médias, flutuantes e com diferentes probabilidades de ocorrência obtidas experimentalmente. A Figura 51 apresenta os valores do coeficiente de distribuição de probabilidades (N) obtidos no ponto de impacto do jato.

Percebe-se, ainda, que tal coeficiente independe do número Froude (Fr_1) e do grau de submergência (S), podendo ser considerado constante para cada probabilidade avaliada. Contudo, no que tange as probabilidades extremas (0,01%, 0,1%, 99% e 99,9%), maior dispersão deste coeficiente é conferida.

$$N = 23 \cdot P_{x\%}^4 - 27,15 \cdot P_{x\%}^3 + 3 \cdot P_{x\%}^2 + 6,56 \cdot P_{x\%} - 2,10 \therefore R^2 = 0,99 \quad \text{Equação 72}$$

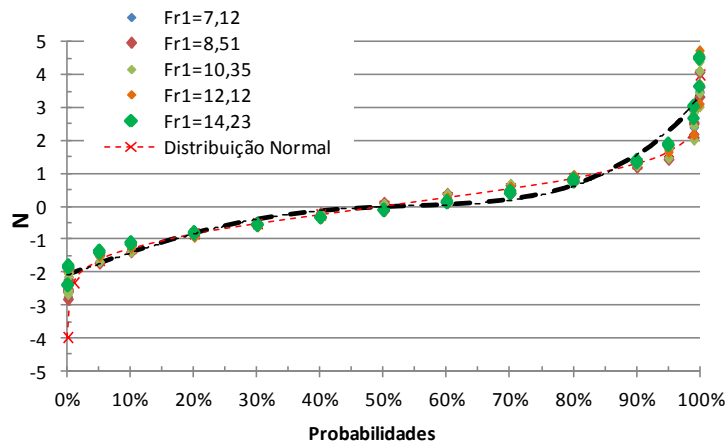


Figura 51 – Coeficiente estatístico N para as pressões com diferentes probabilidades de ocorrência no ponto de impacto do jato.

5.5.4 Espectro de Frequências da Tomada Central

A análise da distribuição de flutuações em frequência se deu para identificar a existência de periodicidade com frequências dominantes, ou seja, em torno de qual frequência se concentra a máxima energia de pressão. Este tipo de análise se torna importante quando o objeto em estudo apresenta algum tipo de periodicidade que não é facilmente discernível a olho nu, em função da superposição de diversas frequências e das variações aleatórias inerentes ao fenômeno. Desta forma, permite refinar ainda mais a caracterização do escoamento em questão.

A densidade espectral foi adimensionalizada de acordo com a Equação 73, relacionando a pressão com a velocidade na entrada do colchão d'água, na terceira potência, com a altura de queda e ainda com a massa específica da água, ao quadrado. No eixo das abscissas, utilizou-se o número adimensional de Strouhal (St), conforme Equação 74. Na Figura 52, apresenta-se o resultado das frequências descobertas na análise.

$$\epsilon = \frac{P \cdot \gamma}{\rho_w^2 \cdot V_j^3 \cdot (H - h)} \quad \text{Equação 73}$$

$$S_t = \frac{f_f \cdot h}{V_j} \quad \text{Equação 74}$$

Onde:

P é a pressão média (m);

γ é o peso específico (N/m^3);

ρ_w é a massa específica da água (kg/m^3);

V_j é a velocidade na entrada do colchão d'água (m/s);

H é a distância vertical entre a saída do bocal e o fundo do canal (m);

h é a espessura do colchão d'água (m);

f_f é a frequência (Hz).

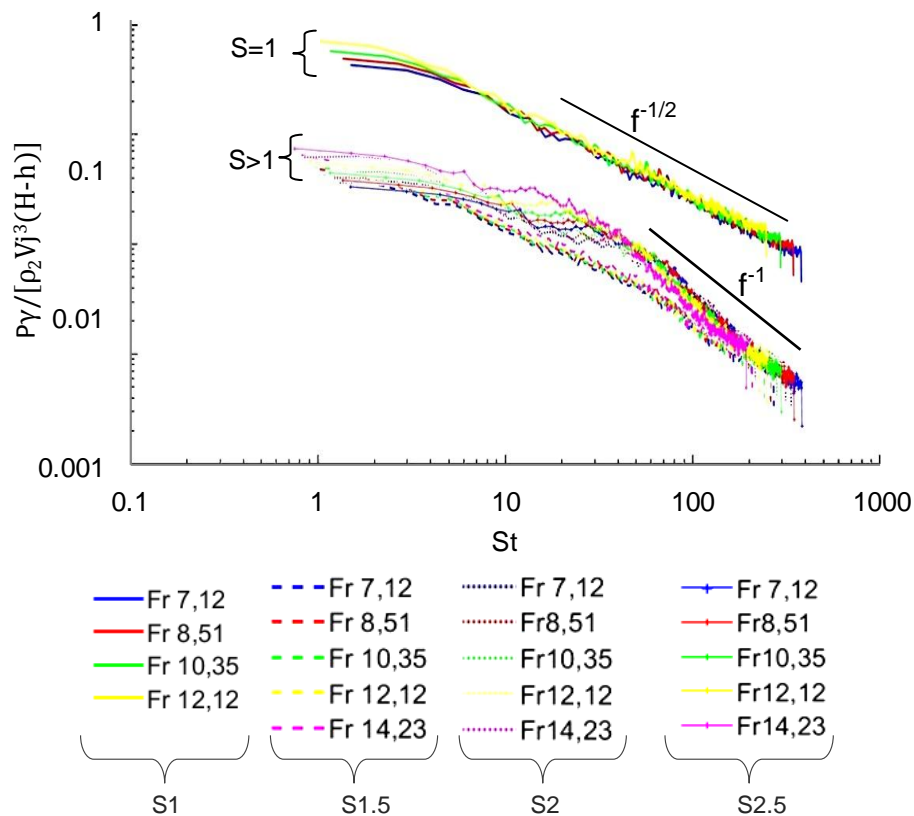


Figura 52 - Espectro de Frequências para o ponto de impacto do jato.

A figura expõe que na situação de menor grau de submergência ($S = 1$) são encontradas as maiores energias. Nas situações em que $St < 7$, quanto maior o número de Froude (Fr_1), maior a energia em tais frequências. Para $St > 7$. O decaimento da densidade espectral adimensionalizada ocorre sob a inclinação $-0,5$ e independe do número Froude (Fr_1).

As situações de ensaio com o grau de submergência superior à unidade ($S > 1$) apresentam menor energia, já que a massa de água do colchão d'água promove boa parte da perda da energia cinética do jato. A partir de $St = 100$, o decaimento de energia independe do número de Froude (Fr_1) e exibe uma inclinação (número de onda) de -1 . Nessa situação, Bollaert (2002) aponta que os vórtices intermediários e de grande escala

são do mesmo tamanho que as estruturas de fluxo e, portanto, sua vorticidade interage com o contorno sólido, promovendo a perda de energia. Por exemplo, para $Fr_1 = 14,23$ - $S = 2,5$, o decaimento passa a ser mais intenso que para o escoamento com $Fr_1 = 14,23$ - $S = 1,5$. Esse resultado reforça o já exposto: quanto mais espesso o colchão d'água, maior é a atenuação das pressões dinâmicas e mais rapidamente ocorre a dissipação da energia.

5.6 AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS LONGITUDAIS DO ESCOAMENTO A JUSANTE DO IMPACTO DO JATO

Depois do impacto da massa de água, o jato é desviado para fora da região de impacto, criando um jato de parede com velocidade paralela ao fundo do canal, que aumenta com a distância radial do eixo do jato (DUARTE et. al., 2014). A formação deste escoamento possui, ainda, energia considerável, podendo causar sérios problemas a jusante do impacto, tais como erosão e revolvimento de pequenas rochas para dentro da bacia de dissipação, causando abrasão, cavitação e vibrações acentuadas na estrutura. A fim de melhor elucidar esta situação, neste item é apresentado o comportamento das pressões dinâmicas e seus adimensionais, ao longo do eixo do canal.

5.6.1 A pressão dinâmica média adimensionalizada

A Figura 53 apresenta, na forma adimensional, o comportamento das pressões dinâmicas em função da relação entre a distância do ponto de impacto (y) e a espessura do colchão da água (h), para $Fr_1 = 10,53$. As pressões dinâmicas, para esta análise, foram adimensionalizadas segundo a Equação 75. As demais situações são contempladas no capítulo 9, item 9.3, na página 162.

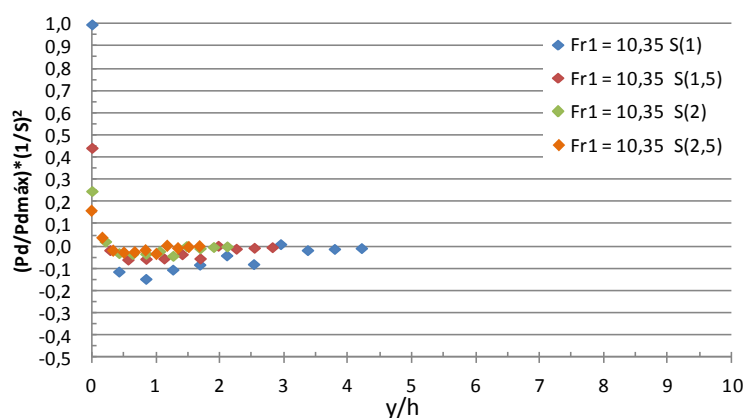


Figura 53 – Pressões dinâmicas adimensionalizadas em função da relação entre a distância do ponto de impacto e a espessura do colchão d'água para $Fr_1 = 10,35$.

$$\frac{P_d}{P_{dmax}} \cdot \left(\frac{1}{S}\right)^2$$

Equação 75

A Figura 54 apresenta os resultados para os ensaios com a submergência igual a um ($S = 1$). Em comparação com a Figura 55, verifica-se que as pressões dinâmicas atingem os menores valores na situação em que $S=1$. Os menores valores se apresentam em torno de $-0,2$, próximos a posição $y = 1\text{h}$, e independem de Fr_1 . A partir da posição $y = 4,5\text{h}$, o adimensional apresenta valor igual a zero para $Fr_1 = 7,12$. Para $Fr_1 = 8,51$, as pressões dinâmicas cessam próximo à posição $y = 3,7\text{h}$. Já para $Fr_1 = 10,35$ e $Fr_1 = 12,12$, as pressões dinâmicas cessam em torno da posição $y = 3\text{h}$.

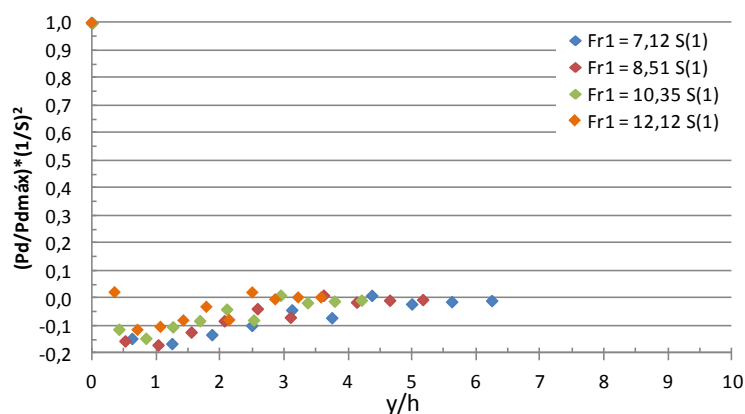


Figura 54 – Pressões dinâmicas adimensionalizadas em função da relação entre a distância do ponto de impacto e a espessura do colchão d'água para ensaios com $S=1$.

Na Figura 55, é apresentado o comportamento do adimensional de pressão para os ensaios com grau de submergência maior que um ($S > 1$). Quando o grau de submergência é igual a 1,5, a posição que marca o término das pressões dinâmicas é $y = 2\text{h}$. Para $S = 2$, a posição gira em torno de $y=1,7\text{h}$ e, para $S = 2,5$, a posição que marca o fim das pressões dinâmicas ocorre em $y = 1,25\text{h}$.

O pequeno aumento de meio grau na submergência de $S = 1$ para $S = 1,5$ proporcionou a diminuição, pela metade, do alcance das pressões dinâmicas. Para $S > 1,5$, mesmo mantendo-se o mesmo incremento no grau de submergência ($+0,5$), as diminuições no alcance das pressões dinâmicas passam a ter menor sensibilidade. Disto, conclui-se que o alcance, ou seja, a distância do ponto de impacto das pressões dinâmicas depende apenas do grau de submergência.

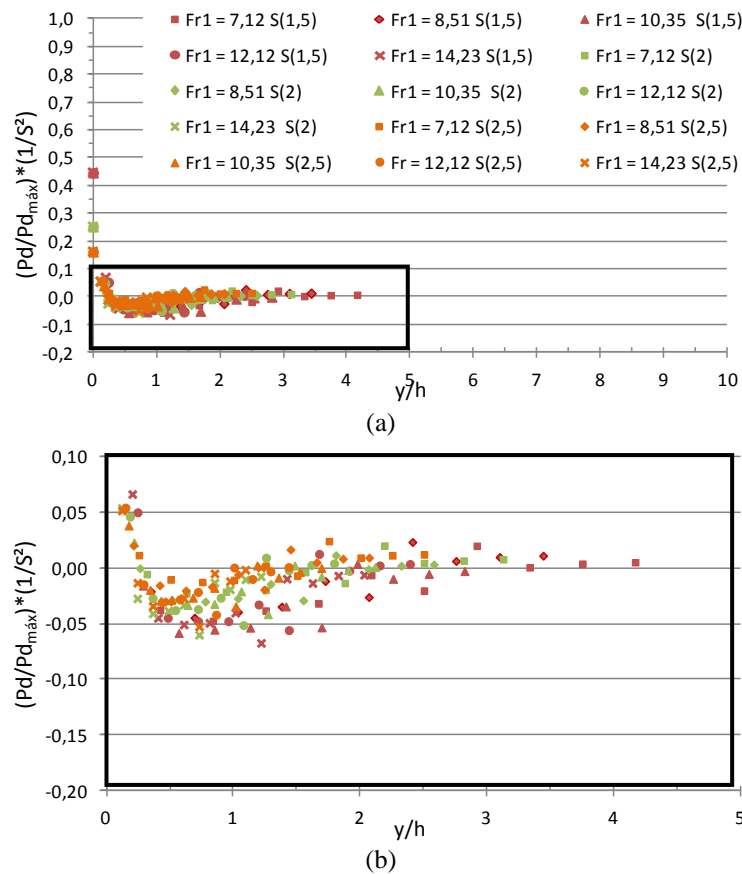


Figura 55 – Pressões dinâmicas adimensionalizadas em função da relação entre a distância do ponto de impacto e a espessura do colchão d'água para ensaios com $S > 1$.

5.6.2 Avaliação do coeficiente de pressão (C_p)

Por ser um adimensional bem consolidado no estudo de pressões, o coeficiente de pressões (C_p) tem seu comportamento avaliado de acordo com as relações de posição (y/h). Na Figura 56 está apresentado o comportamento do C_p para $Fr_1 = 10,35$, com todos os graus de submergências testados. As demais situações estão expostas no capítulo 9, item 9.4, na página 164.

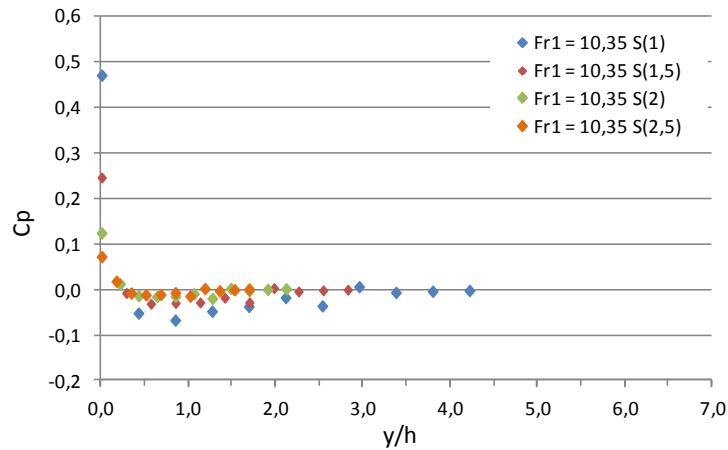


Figura 56 – Comportamento do adimensional C_p em função da relação y/h para $Fr_1 = 10,35$.

Na Figura 57, são mostrados os resultados para todas as condições de ensaio.

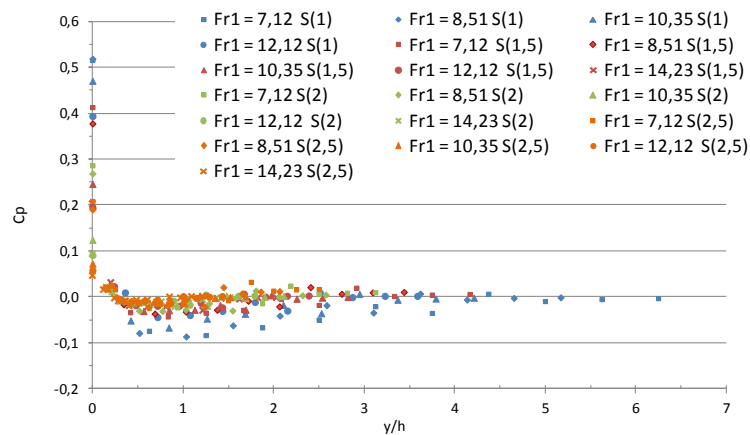


Figura 57 – Comportamento da distribuição longitudinal do coeficiente de pressão (C_p) em função da relação y/h para todas as situações de ensaio.

A conclusão que aqui se chega é que o máximo valor do coeficiente ocorre na posição de impacto, indicando a prevalência dos efeitos de pressão sobre os efeitos cinéticos. Logo, na tomada adjacente ao ponto de impacto, o valor de C_p pode atingir a metade do valor alcançado na posição de estagnação. Em torno da posição $y = 1h$, os valores do coeficiente C_p apresentam as menores magnitudes. Decorre, também, que os menores coeficientes são registrados para o grau de submergência igual a 1. Quando o coeficiente C_p atinge o valor zero (0,0), as pressões dinâmicas não mais existem, indicando, portanto, o final da região de influência do impacto do jato.

Identifica-se, também, que o aumento da submergência provoca a atenuação da pressão dinâmica no ponto de impacto do jato. Além disso, à medida que o grau de submergência aumenta, o alcance das pressões dinâmicas é menor.

5.6.3 Variação da distribuição longitudinal do coeficiente de flutuação de pressão (C_p')

Na Figura 58, é apresentado o comportamento do coeficiente de flutuação de pressão (C_p') para a situação em que $Fr_1 = 10,35$. Os demais gráficos acerca do comportamento do coeficiente C_p' está contemplado no capítulo 9, item 9.5, na página 166.

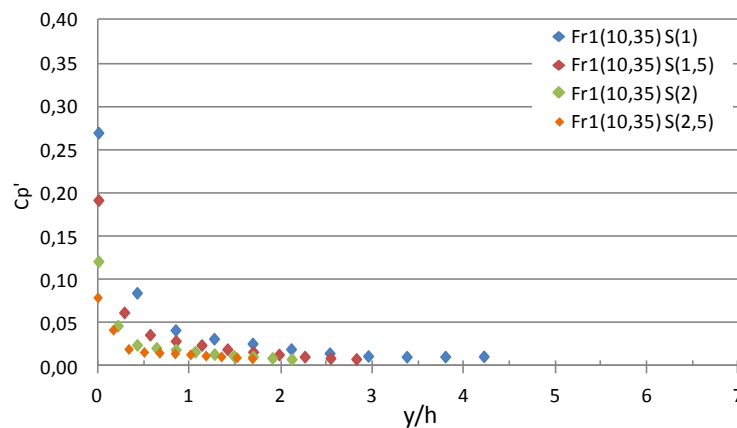


Figura 58 – Comportamento do coeficiente de flutuação de pressão (C_p') em função da relação y/h para $Fr_1 = 10,35$.

A Figura 59 apresenta o comportamento do coeficiente de flutuação para as situações de escoamento com grau de submersão igual à unidade. Na imagem, percebe-se que o valor máximo da flutuação ocorre na tomada que recebe o impacto do jato e tem magnitude próxima a 0,3 para $Fr_1 = 7,12$, que tem a menor espessura do colchão ($h = 0,120$ m). À medida que o valor de Fr_1 aumenta, de forma latente, o coeficiente C_p' nesse ponto diminui. A menor flutuação no ponto de impacto ocorre para $Fr_1 = 12,12$ com a espessura do colchão da água igual a $h = 0,209$ m. A partir da posição $y = 3'h$, o coeficiente flutua em torno do valor zero, mesma posição em que as pressões dinâmicas não atuam mais no fundo do canal.

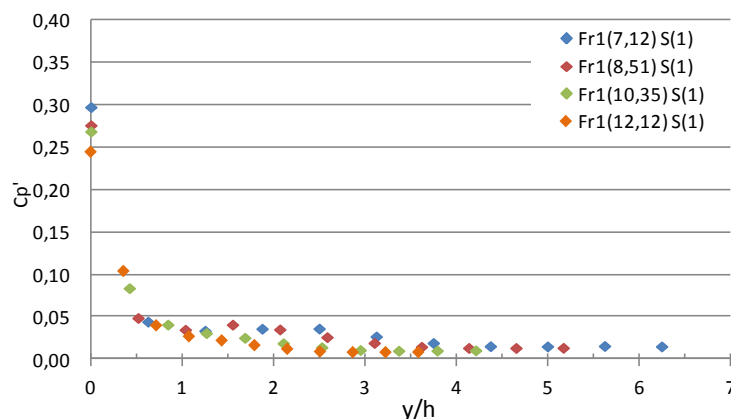


Figura 59 – Comportamento do coeficiente de flutuação de pressão (C_p') em função da relação y/h para o grau de submersão igual a um ($S = 1$).

A Figura 60 contempla o comportamento das flutuações de pressão para os graus de submersões maiores que um ($S > 1$).

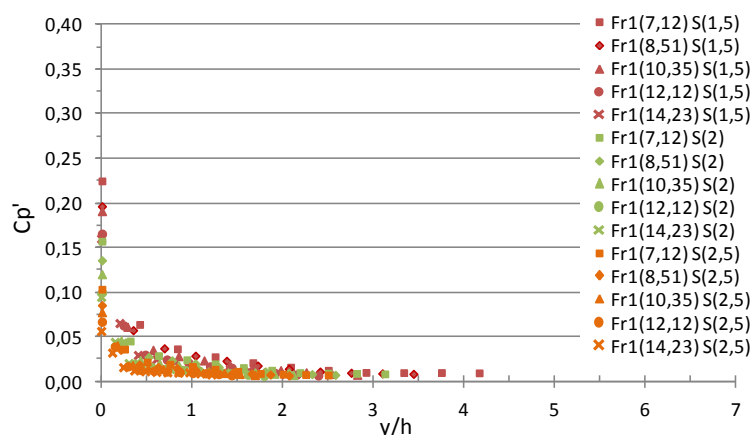


Figura 60 – Comportamento do coeficiente de flutuação de pressão (C_p') em função da relação y/h para as submersões maiores que 1 ($S > 1$).

Pela observação da imagem, novamente, ocorre a diminuição da flutuação no ponto de impacto do jato ($y/h = 0$) com o aumento da espessura do colchão d'água. No ponto de impacto até a posição $y = 1,5h$, encontram-se as maiores dispersões. O valor do coeficiente de flutuação de pressão (C_p') cai para $1/3$ do valor máximo já na posição $y = 0,5h$ e, a partir da posição próxima a $y = 2h$, o coeficiente mantém-se em torno de zero. Essa é a mesma posição em que o coeficiente de pressão (C_p) se conserva, também, em torno deste valor. Há que se destacar que tal posição é ligeiramente diferente para diferentes Fr_1 's. O coeficiente C_p' se aproxima de zero mais rapidamente quanto maior o valor de Fr_1 que, consequentemente, tem a maior espessura de colchão d'água.

5.6.4 Distribuição Longitudinal do Coeficiente de assimetria (A_D) e do coeficiente de curtose (A_K)

Conforme já foi abordado, o coeficiente de assimetria pode ser relacionado com as zonas de separação do escoamento com o contorno sólido. Apresenta-se, na Figura 61 e, com maior detalhe, na Figura 62, os coeficientes de assimetria para as amostras de pressão.

Na Figura 62, evidencia-se, entre as posições $0,5 \leq y/h \leq 1,0$, uma região onde os coeficientes de assimetria são mais dispersos, chegando à valores máximos, ao passo que próximo à $y = 2h$ atingem os menores valores. Constitui $y = 1,5h$ a posição em que os coeficientes de assimetria mudam de sinal, passando de positivos para negativos, indicando o início da separação do escoamento do contorno sólido. É razoável averiguar que, nos casos com menor número de Froude (Fr_1) e, por consequência, menores espessuras de colchão d'água (h), os coeficientes de assimetria persistem com valores negativos até posições mais distantes do ponto de impacto do jato. Então, pautando-se também nas conclusões já delineadas, é possível concluir que a zona de flutuações e pressões extremas ocorre para colchões d'água menos espessos.

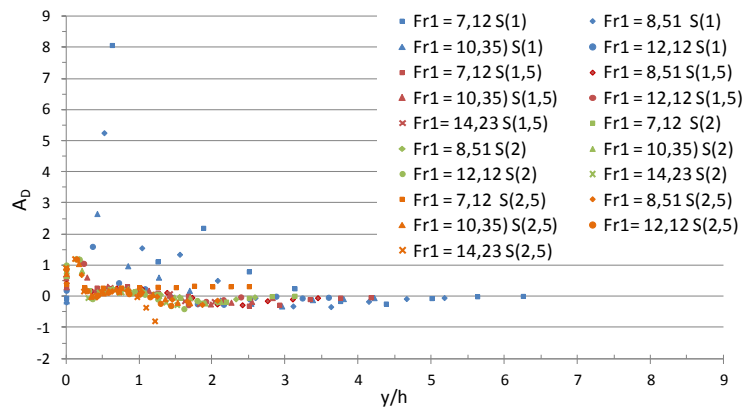


Figura 61 – Coeficientes de assimetria.

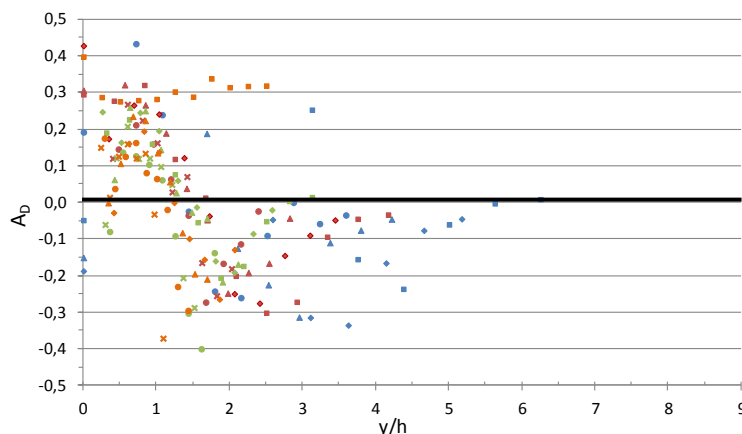


Figura 62 – Coeficientes de assimetria com maior detalhe.

Das análises efetuadas, a espessura do colchão da água, além de ser importante amortecedor na zona de impacto do jato, assume nova importância no tocante à ocorrência de subpressões ao longo do canal. Para as condições de ensaio com menores números de Froude (Fr_1), estão associadas as menores alturas conjugadas lentas (h_2) e, para maiores Fr_1 , as maiores espessuras do colchão d'água. Quanto mais espesso for o colchão d'água, maior é a capacidade atribuída a ele de atenuar as subpressões. Significa que o colchão d'água se impõe frente ao descolamento do escoamento do fundo do canal. Essa situação pode ser conferida na Figura 63.

A avaliação do coeficiente de curtose das amostras de pressão, Figura 64, vem confirmar as informações obtidas com a análise da assimetria.

O resultado corrobora, também, a análise realizada para as flutuações de pressão quando, no ponto de impacto do jato, o coeficiente de curtose aborda valores negativos, indicando maior flutuação de pressão. À medida que o ponto de análise se desloca para jusante, os coeficientes de curtose aumentam, representando uma região de maior concentração dos dados em torno da média, evidenciando a menor flutuação de pressão.

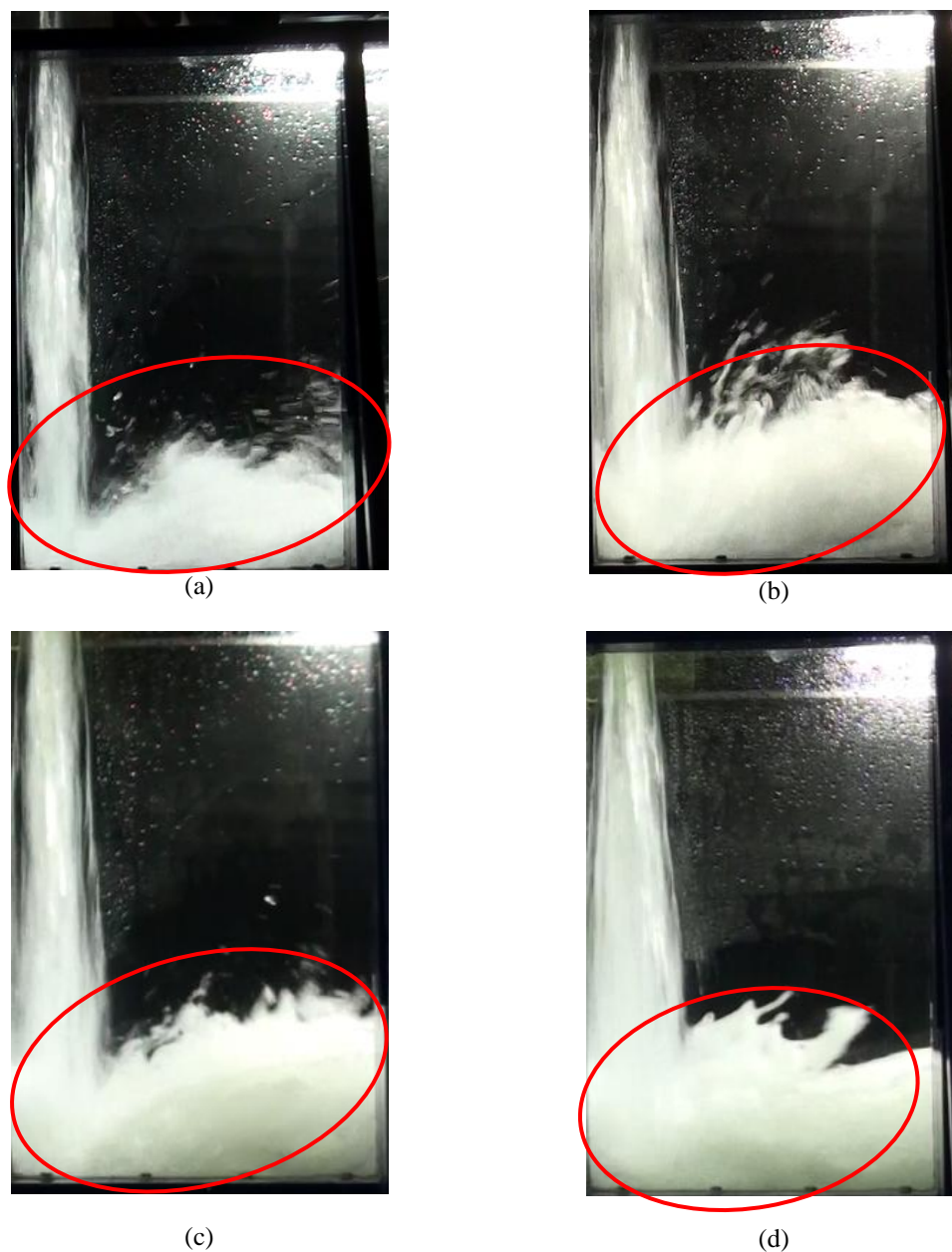


Figura 63 - Influência da espessura do colchão d'água no potencial de subpressões a jusante do impacto:

(a) $Fr_1 = 7,12$ $S = 1$, (b) $Fr_1 = 8,51$ $S = 1$, (c) $Fr_1 = 10,35$ $S=1$ e (d) $Fr_1 = 12,12$ $S = 1$.

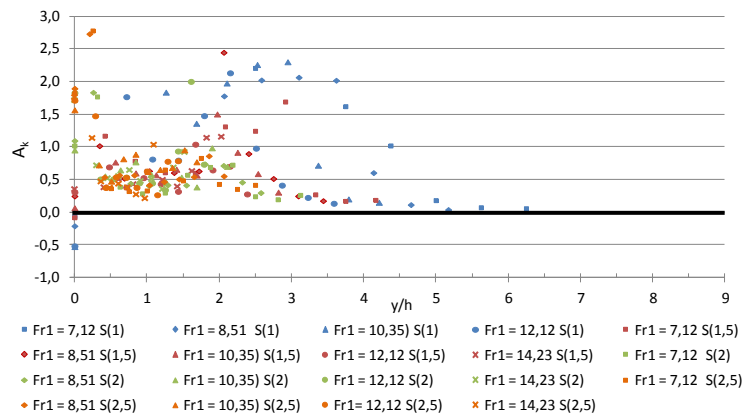


Figura 64 – Coeficientes de curtose.

5.6.5 Distribuição Longitudinal do Coeficiente Estatístico de Probabilidades (N)

A partir do conhecimento da pressão média, do desvio padrão e do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade (N), é possível estimar os valores de pressão para diferentes probabilidades de ocorrência através da Equação 61, página 91.

Por não obedecer a distribuição normal (Gaussiana) de probabilidades, a determinação do coeficiente N, ao longo do escoamento, é um ponto nevrálgico para a utilização da metodologia de previsão de valores extremos de pressão. Logo, foram determinados os valores do coeficiente estatístico N para as probabilidades de 0,01%, 0,1%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 95%, 99% e 99,9%.

A Figura 65 apresenta os valores de coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade (N), das amostras de pressão, associados às probabilidades de não excedência de 0,1%, ilustrando que os mesmos independem do número de Froude (Fr_1) e do grau de submergência (S). Ainda, próximo ao ponto de impacto, registram-se os maiores valores de N, para em $y \sim 0,25 \cdot h$ atingirem o valor de $N = -2,5$, quando apresentam um leve aumento entre as posições $y = 0,5 \cdot h$ a $y = 2 \cdot h$. Após essa distância, o valor do coeficiente tende ao valor, constante, de $-2,5$. É impossível deixar de notar que os dados para o grau de submergência igual a um ($S = 1$) apresentam forte dispersão, quase se desviando do comportamento médio dos demais resultados, exceto para $y > 4 \cdot h$.

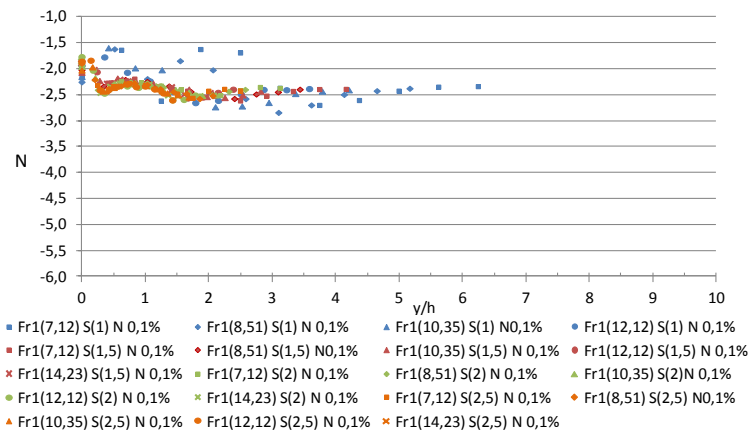


Figura 65 – Coeficiente estatístico para pressões com probabilidade de 0,1% de não excedência.

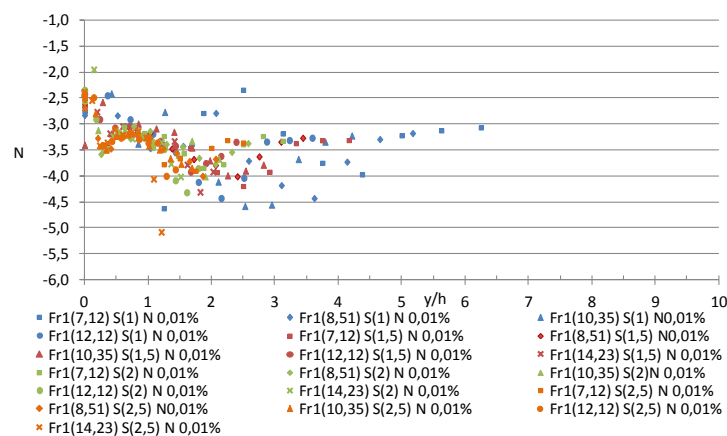


Figura 66 – Coeficiente estatístico para pressões com probabilidade de 0,01% de não excedência.

O coeficiente N associado às pressões de 0,01% ($P_{0,01\%}$) de não excedência tem maior dispersão que nos casos de $P_{0,1\%}$ dos coeficientes. Em contrapartida, na Figura 66, nota-se que o comportamento é similar ao comportamento dos coeficientes para $N = 0,1\%$, com valores menores. Próximo ao ponto de impacto, registram-se os maiores valores de N ; em torno de $y \sim -2,5h$. Em $y \sim 0,25$, os valores do coeficiente apresentam um mínimo local, $N \sim -3,5$. Entre as posições $y = 0,5h$ a $y = 1h$, ocorre um leve aumento, quando passam a decrescer chegando a um valor mínimo em torno de $-4,0$ a $-4,5$, com significativa dispersão. Pode-se, ainda, identificar uma leve tendência ao valor constante de $N \sim -3,5$. A maior dispersão ocorre para as situações em que o grau de submergência é igual à unidade.

Ponderando-se a Figura 67, verifica-se que o coeficiente estatístico (N) associado à probabilidade de 99% de não excedência pode ser entendido como constante, em torno

de 2,2, com um pequeno pico imediatamente após a posição $y = 0$. Novamente, para os casos com grau de submergência igual a 1, registra-se maior dispersão para $y < 2,5h$.

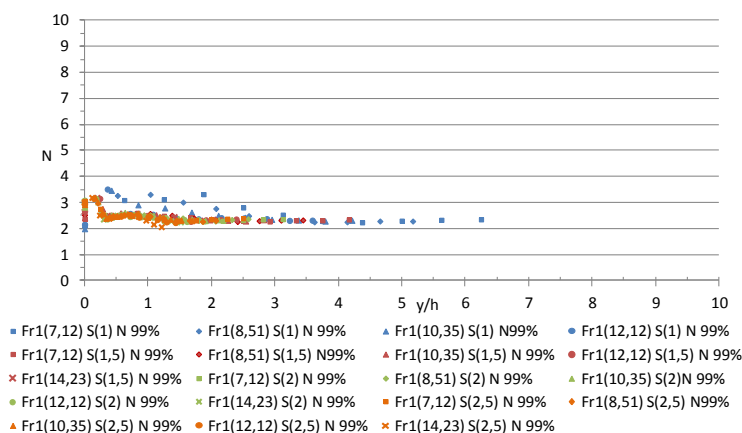


Figura 67 – Coeficiente estatístico para probabilidade de 99%

Já para o coeficiente associado à probabilidade de pressões de 99,9%, Figura 68, o comportamento dos escoamentos com $S = 1$, além de grande dispersão, não tem comportamento associado aos demais graus de submergência.

O maior valor do coeficiente de dispersão ocorre entre as posições $y = 0$ e $y = 0,5h$. Após o pico, retorna a decrescer, permanecendo constante ($N = 3$) a partir da posição $y = 1,5h$.

Em todos os casos, o grau de submergência independe do número de Froude (Fr_1).

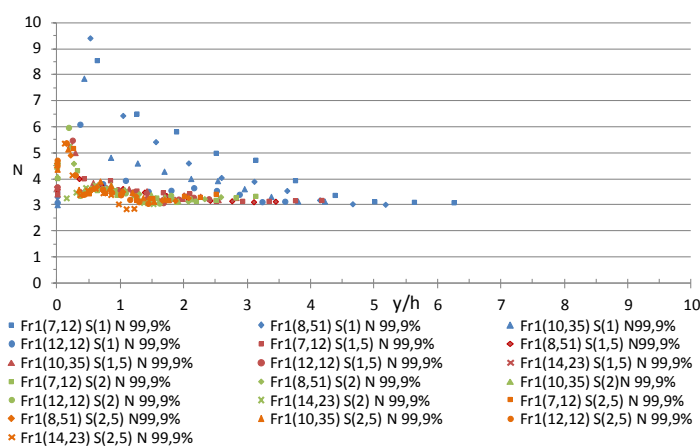


Figura 68 – Coeficiente estatístico para probabilidade de 99,9%

Para as demais probabilidades de não excedência, o coeficiente N apresenta tendência a um valor médio único para cada probabilidade, independente do número de Froude (Fr_1) e do grau de submergência (S).

Alguma pequena dispersão é registrada próxima ao ponto de impacto do jato. Nestas posições, o coeficiente N assume comportamento distinto, apresentando-se com crescimento ascendente para as probabilidades de 5%, 10%, 20% e 95% e crescimento descendente para as probabilidades de 60%, 70% e 80%. As figuras que ilustram estas conclusões podem ser visualizadas no capítulo 9, item 9.6, na página 168.

A Figura 69 apresenta os valores médios para cada uma das probabilidades e o ajuste proposto. Pode-se verificar que os pontos seguem um ajuste quadrático, sendo possível relacionar a probabilidade desejada e o seu respectivo coeficiente, de acordo com a Equação 76.

$$N = \frac{-2,85 + 5,40 \cdot \varphi}{1 + 10,8 \cdot \zeta - 11,1 \cdot \zeta^2} \quad \text{Equação 76}$$

Sendo ζ o valor da probabilidade desejada em valores decimais.

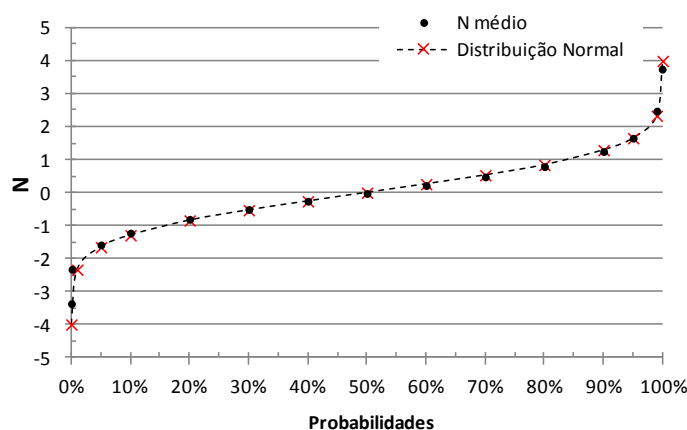


Figura 69 – Ajuste proposto para o cálculo do coeficiente de distribuição de probabilidades (N).

Embora os valores dos coeficientes (N) obtidos se aproximem da variável reduzida na distribuição normal, não é possível afirmar que os resultados seguem a distribuição normal já que os coeficientes de assimetria e curtose são diferentes daqueles esperados em uma distribuição normal.

5.6.6 Avaliação do Espectro de Frequências

A análise da distribuição de flutuações em frequências se deu a partir da observação dos gráficos de densidade espectral estimadas em duas tomadas de pressão instaladas a jusante do ponto do impacto do jato. Na Figura 70, são mostrados os espectros para a primeira tomada após o impacto (tomada 9). Na Figura 71, tem-se o espectro de frequências para a última posição com medições (tomada 1), ver Figura 30.

Na Figura 70, identifica-se que nas situações em que $S=1$, embora as flutuações de pressão apresentem menos energia, o decaimento da curva, com o aumento da frequência adimensionalizada, é quase linear e suave, quando comparado com os espectros que caracterizam ensaios com grau de submergência maior. Resultado de maior destaque ocorre para o grau de submergência igual a 1,5. Estes escoamentos concentram mais energia que as situações com $S = 2$, $S = 2,5$, e, também, $S = 1$. É possível, também, identificar duas declividades no decaimento das curvas, uma mais suave, para $St < 0,5$, e outra declividade mais aguda para $St > 0,5$. O gráfico da figura 76 apresenta duas linhas auxiliares para visualização desta mudança entre declividades - $1/3$ e -1 .

Para os demais graus de submergência ($S = 2$ e $S = 2,5$), registra-se o mesmo comportamento, apontando um declínio mais suave até $St < 0,3$ e um decaimento mais agudo para maiores valores do número de Strouhal.

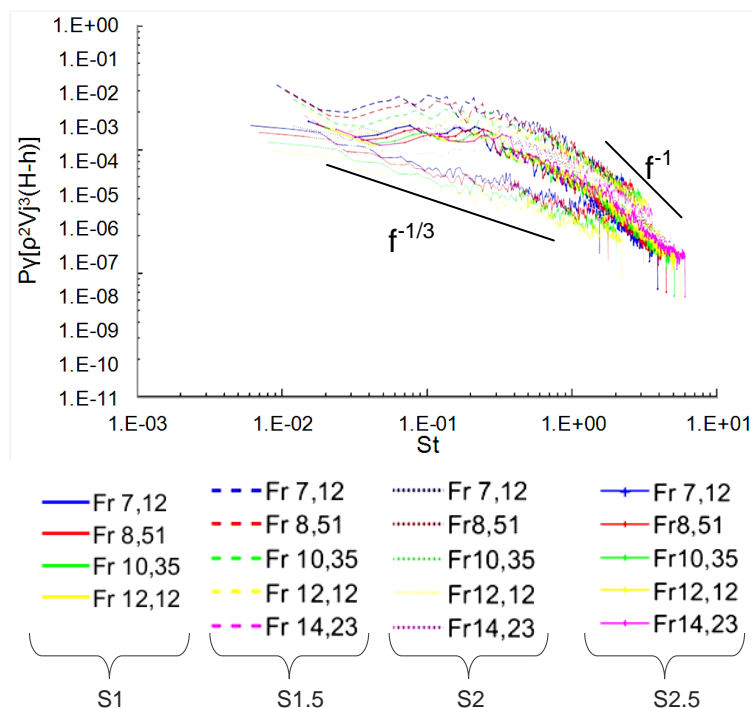


Figura 70 – Espectro de frequências para a tomada 9, 1ª tomada a jusante do impacto do jato, todos números de Froude (Fr_1) e todos os graus de submergência.

Na Figura 71 é mostrado o espectro de frequências para a última tomada de medição, afastada 0,75 m do ponto de impacto do jato. Nessa situação, ocorre, para os menores números de Strouhal ($St < 0,1$), comportamento inversamente proporcional ao grau de submergência. Registra-se maior energia nos casos com menor grau de submergência. A partir de $St > 0,2$, o espectro independe do número de Froude (Fr_1) e do grau de submergência (S).

O aumento de energia nas flutuações com frequências mais altas ($St > 1,0$) pode ser relacionado às oscilações inerentes ao funcionamento do equipamento eletrônico.

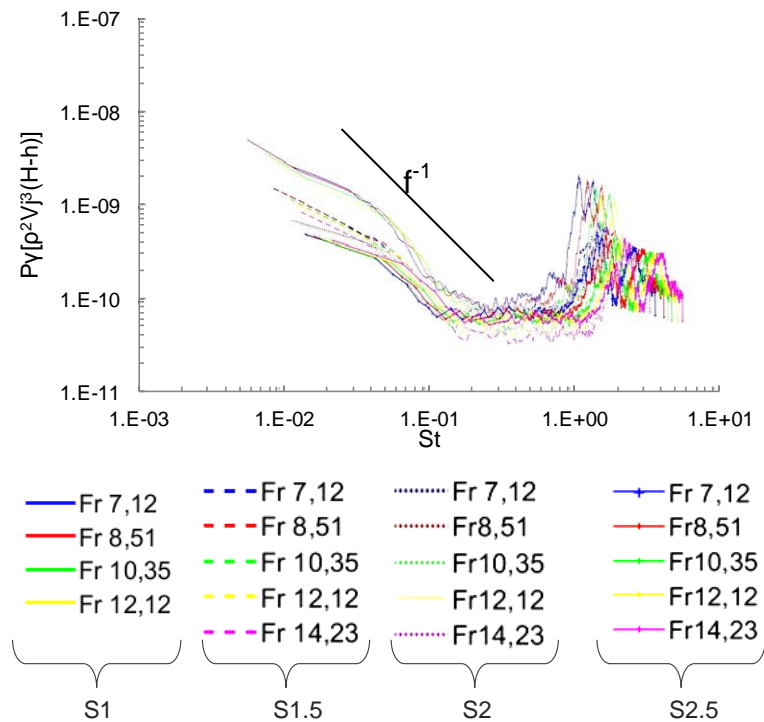


Figura 71 – Espectro de frequências para a tomada 1, última posição de tomada de pressão, todos números de Froude (Fr_1) e todos os graus de submergência.

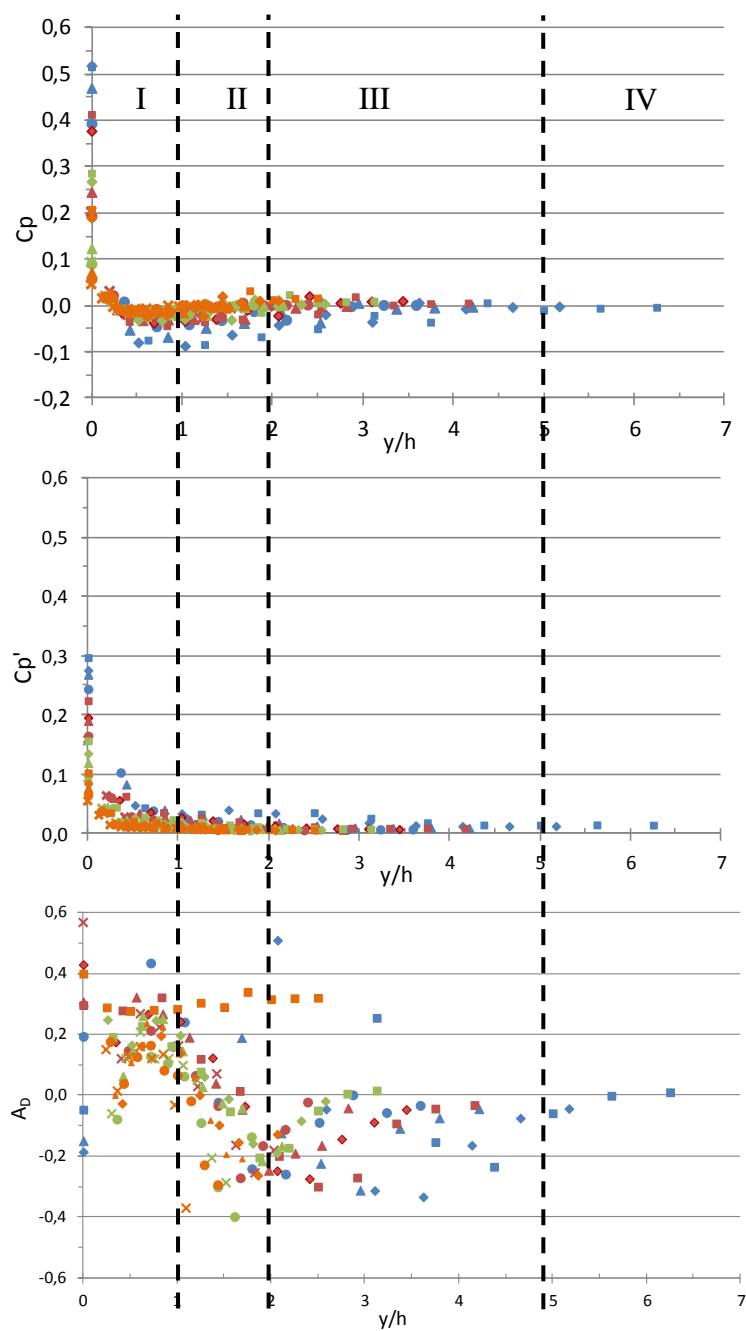
De forma clara, vê-se que, na segunda imagem, a energia presente é bem menor que na primeira, indicando a ocorrência da dissipação de energia ao longo do canal, incluído o efeito da macroturbulência. Não foi possível identificar decaimentos da ordem de $-5/3$, número de onda associado à região ao equilíbrio universal no espectro de energia relacionado à turbulência tridimensional, homogênea e isotrópica.

No capítulo 9, item 9.7, na página 172, podem ser visualizadas as funções de densidade espectral para todos os valores de Fr_1 e de Submergência ao longo do eixo do canal.

5.6.7 Considerações acerca das características longitudinais do escoamento a jusante do impacto do jato

A análise dos parâmetros abordados permitiu a identificação de quatro zonas distintas, Figura 72.

- Zona I - localizada entre as posições $0 \leq y/h \leq 1$, corresponde a região de impacto do jato. Nesta região são encontradas as máximas pressões, as máximas flutuações de pressão e, também os máximos coeficientes de assimetria.
- Zona II - localizada entre as posições $1 < y/h \leq 2$, corresponde a região de reflexão do jato. Esta região foi delimitada pela análise dos coeficientes de assimetria, os quais passam de valores positivos para valores negativos caracterizando a ocorrência do descolamento do escoamento no contorno sólido.
- Zona III - localizada entre as posições $2 < y/h \leq 5$, caracteriza-se pela acomodação do escoamento. Foi delimitada pela análise dos coeficientes de assimetria, que permanece com valores negativos.
- Zona IV - localizada para posições $y/h > 5$ caracteriza-se pelo fim da influência do jato, foi delimitada pela análise dos coeficientes de assimetria e das pressões dinâmicas que ficam em torno de zero indicando o fim da influência do jato no escoamento.



- $Fr1 = 7,12 \ S(1)$ ◆ $Fr1 = 8,51 \ S(1)$ ▲ $Fr1 = 10,35 \ S(1)$ ● $Fr1 = 12,12 \ S(1)$
- $Fr1 = 7,12 \ S(1,5)$ ◆ $Fr1 = 8,51 \ S(1,5)$ ▲ $Fr1 = 10,35 \ S(1,5)$ ● $Fr1 = 12,12 \ S(1,5)$
- × $Fr1 = 14,23 \ S(1,5)$ ■ $Fr1 = 7,12 \ S(2)$ ◆ $Fr1 = 8,51 \ S(2)$ ▲ $Fr1 = 10,35 \ S(2)$
- $Fr1 = 12,12 \ S(2)$ × $Fr1 = 14,23 \ S(2)$ ■ $Fr1 = 7,12 \ S(2,5)$ ◆ $Fr1 = 8,51 \ S(2,5)$
- ▲ $Fr1 = 10,35 \ S(2,5)$ ● $Fr1 = 12,12 \ S(2,5)$ × $Fr1 = 14,23 \ S(2,5)$

Figura 72 - Delimitação das zonas do escoamento provocado pelo impacto do jato.

5.7 AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO PROVOCADO PELO IMPACTO DO JATO SOB A PERSPECTIVA DOS ADIMENSIONAIS ASSOCIADOS AO RESSALTO HIDRÁULICO A JUSANTE DE VERTEDOURO

Como uma última proposta desta pesquisa, tem-se a avaliação do escoamento provocado pelo impacto do jato segundo os parâmetros adimensionais utilizados no estudo de ressaltos hidráulicos, formados em bacias de dissipação a jusante de vertedouro.

A avaliação se deu mediante a comparação dos resultados da presente pesquisa, com os resultados apresentados por Dai Prá (2011) e com os apresentados por Novakoski (2016).

Dai Prá (2011), em seus estudos, buscou caracterizar a ocorrência do fenômeno por meio da análise de pressões (médias, flutuantes e extremas) junto ao fundo de uma bacia de dissipação, com uma curva de concordância ligando o vertedouro à bacia, Figura 73, de modo que o escoamento não sofresse uma mudança de direção abrupta.



Figura 73 – Ressonância hidráulica a jusante de vertedouro com calha lisa e com curva de concordância entre vertedouro e bacia de dissipação.

(DAI PRÁ, 2011)

Já Novakosky (2016) efetuou sua pesquisa em um modelo físico de um vertedouro em degraus. Seus objetivos foram, da mesma forma que Dai Prá (2011), caracterizar as pressões atuantes no fundo de uma bacia de dissipação provocadas pela formação de um ressalto hidráulico. Diferentemente do primeiro autor, a ligação entre o dissipador em degrau e a bacia se deu sem a presença de uma curva de concordância. Logo, o escoamento sofria uma mudança de direção, de forma abrupta, aproximadamente $53,18^\circ$, Figura 74.



Figura 74 – Ressonância hidráulica a jusante de vertedouro em degraus, sem concordância entre vertedouro e bacia de dissipação.

(NOVAKOSKI, 2016)

Frente ao exposto, ao passo que o nível de jusante aumenta, passa a existir uma condição de escoamento semelhante ao movimento brusco de um ressalto hidráulico. Sendo assim, três cenários podem ocorrer, a destacar:

- escoamento livre, Figura 75. A espessura do colchão d'água ou o nível de jusante não interfere nas pressões no ponto de impacto do jato.

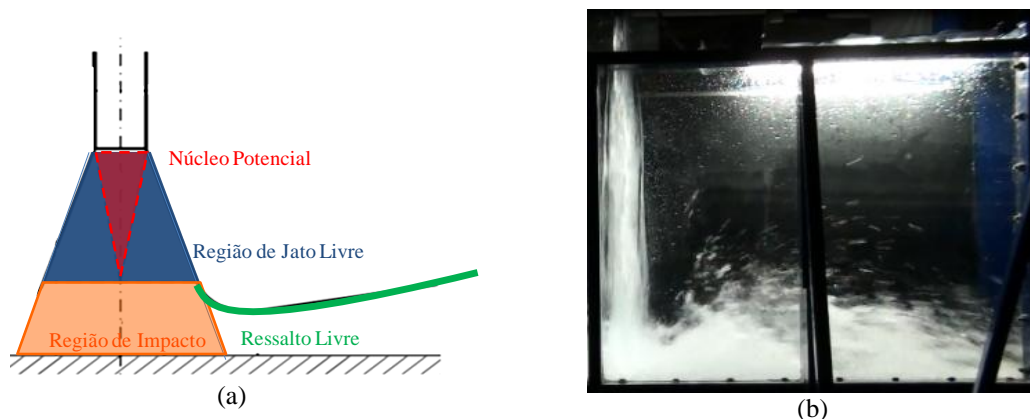


Figura 75 – Ressonância Livre: a) esquema da configuração de ressalto livre; b) ressalto livre a jusante do impacto do jato pra $Fr_1 = 7,12$ e $S < 1$.

- ressalto clássico, Figura 76. Existe colchão d'água, porém sua espessura não é suficiente para amortecer as pressões no ponto de impacto.



Figura 76 – Ressalto clássico: a) esquema da configuração do ressalto clássico; b) ressalto clássico a jusante do impacto do jato pra $Fr_1 = 10,35$ e $S = 1$.

- ressalto submerso ou afogado, Figura 77. A espessura do colchão d'água é capaz de amortecer as pressões dinâmicas no ponto de impacto. Além disso, quanto maior for o nível, maior é a capacidade de amortecimento.



Figura 77 – Ressalto afogado: a) esquema da configuração do ressalto afogado; b) ressalto afogado/submerso a jusante do impacto do jato $Fr_1 = 10,35$ e $S = 2$.

5.7.1 O Ressalto clássico e os adimensionais característicos

Diversos estudos acerca do comportamento de pressões em bacias de dissipação por ressalto hidráulico foram efetuados, podendo se citar Marques et. al. (1996), Teixeira (2008), Wiest (2008), Dai Prá (2011), entre outros. Estes autores propuseram a utilização de dois adimensionais que bem representam o comportamento das pressões em função de uma posição atrelada ao início na bacia de dissipação. O primeiro, ψ , adimensional de pressão, é expresso de acordo com a Equação 77. Já o adimensional de posição é determinado pela Equação 78.

$$\psi = \frac{\frac{P - h_1}{h_2 - h_1}}{\frac{h}{h_2}} \quad \text{Equação 77}$$

$$\Gamma = \frac{y}{h_2 - h_1} \quad \text{Equação 78}$$

Onde:

P é a pressão no ponto (m);

h_2 é a altura conjugada lenta para o ressalto clássico (m);

h_1 é a altura conjugada rápida para o ressalto clássico (m);

h é a espessura do colchão d'água (m);

y é a posição da tomada de pressão, longitudinal ao fluxo do escoamento (m).

Os mesmos autores propuseram um novo adimensional a fim de caracterizar as flutuações de pressão a jusante dos vertedouros. Este adimensional (χ) é expresso pela Equação 79

$$\chi = \frac{P'}{E_{hp}} \cdot \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \quad \text{Equação 79}$$

Onde:

P' é a flutuação de pressão no ponto (m);

h_2 é a altura conjugada lenta para o ressalto clássico (m);

h_1 é a altura conjugada rápida para o ressalto clássico (m);

E_{hp} é a energia dissipada no ressalto hidráulico (m), calculada segundo a Equação 80.

$$E_{hp} = \frac{1}{4} \cdot \frac{(h_2 - h_1)^3}{h_2 \cdot h_1} \quad \text{Equação 80}$$

É de extrema importância apontar que essas equações, para o que se destinam, representam, de fato, a ocorrência do ressalto hidráulico clássico, ou seja, sem afogamento.

Na Figura 78, estão os resultados da adimensionalização para as pressões obtidas a jusante do impacto do jato vertical. É possível verificar a interferência do número de Froude (Fr_1) no adimensional. Ademais, os dados apresentam grande dispersão, exceto

a partir da posição $\Gamma = 5$, quando os valores de ψ tendem a 1, indicando o fim da influencia do jato. As menores pressões ocorrem inversamente proporcional ao n° de Froude (Fr_1). Ou seja, tanto menor o Fr_1 , maior é a distância de ocorrência do menor valor de pressão.

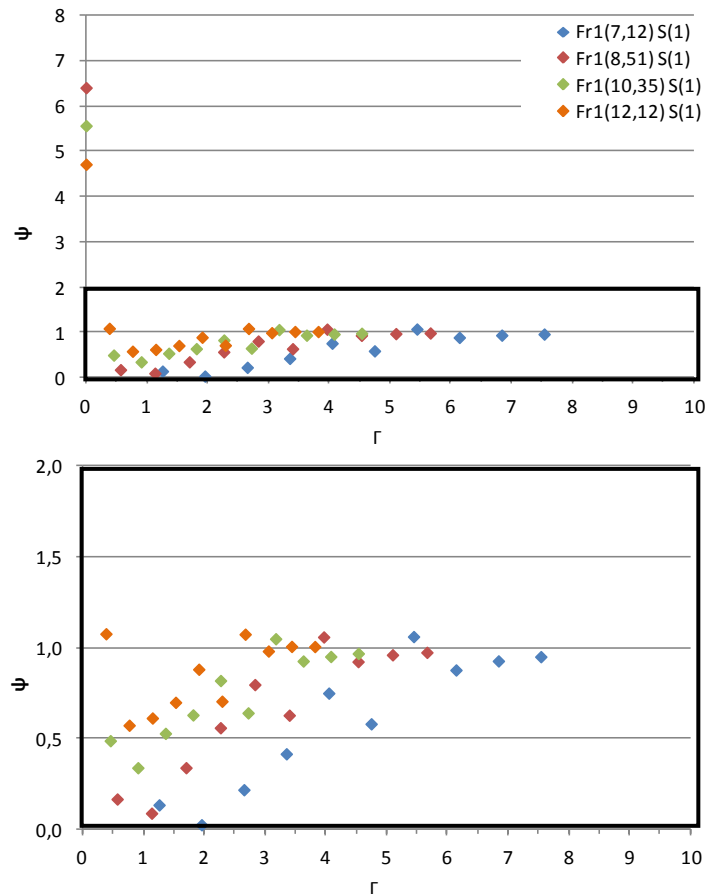


Figura 78 - Pressões médias adimensionalizadas - Grau de Submersão: 1.

As imagens, Figura 79 e Figura 80, apresentam a comparação do adimensional (ψ), resultado da presente pesquisa, com o adimensional obtido por Dai Prá (2011) e por Novakoski (2016), respectivamente.

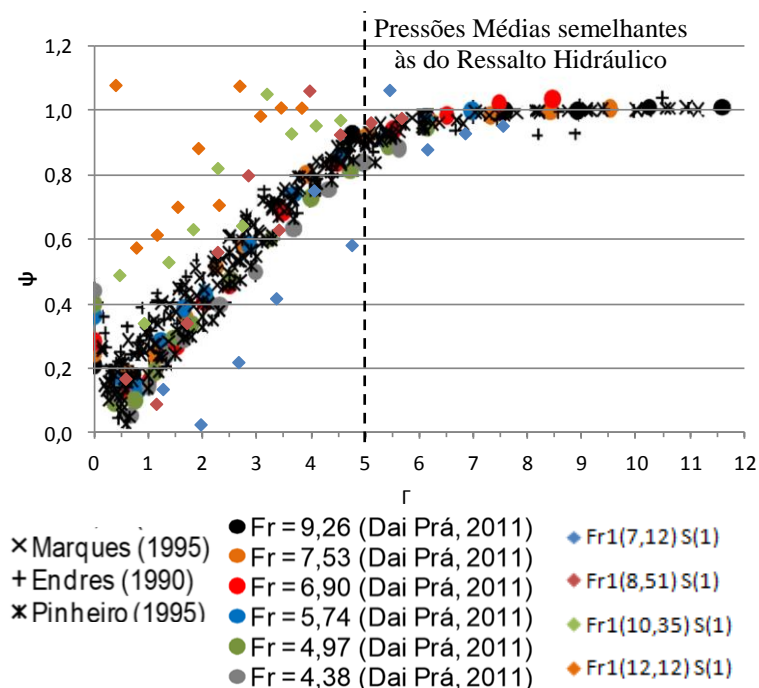


Figura 79 - Pressões médias adimensionalizadas comparadas com os resultados de Dai Prá (2011).

(adaptado de DAI PRÁ, 2011)

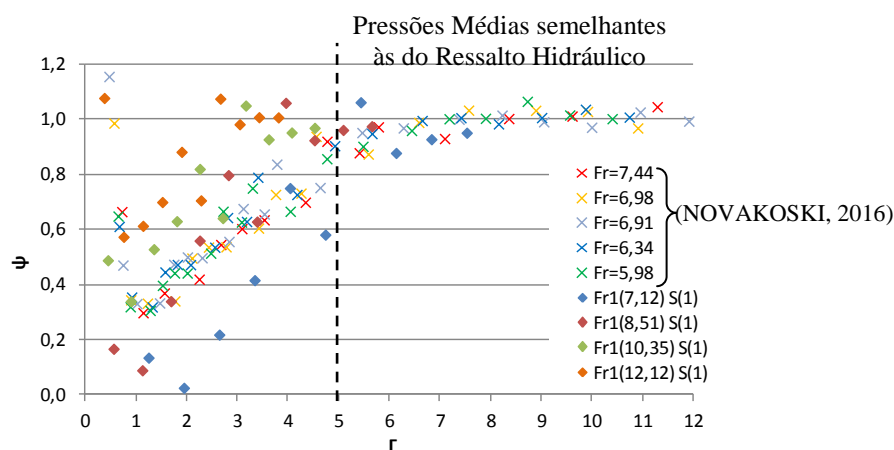


Figura 80 - Pressões médias adimensionalizadas comparadas com os resultados de Novakoski (2016).

(adaptado de NOVAKOSKI, 2016)

Sumariamente, o comportamento do adimensional ψ relativo ao jato vertical guarda semelhança com o comportamento dos demais escoamentos, sobretudo para a posição $\Gamma \geq 5$, os valores de ψ tendem a 1, tal qual os valores do ressalto hidráulico.

Por outro lado, é possível identificar maior dispersão dos adimensionais associados ao impacto do jato. A posição $\Gamma = 8$ assinala o final da influência do ressalto hidráulico,

logo, $\psi = 1$. No caso do escoamento provocado pelo jato, esta posição varia de forma sensível e inversamente proporcional ao valor de Fr_1 . Para $Fr_1 = 7,12$, $\Gamma \sim 5$, para $Fr_1 = 8,51$, $\Gamma \sim 4$, para $Fr_1 = 10,35$ e $Fr_1 = 12,12$, $\Gamma \sim 3$.

Na Figura 81 estão expressos os resultados para a flutuação de pressão, representada pelo adimensional χ , conforme Equação 79.

No ponto de impacto do jato, registram-se os maiores valores de χ . No entanto, logo na segunda posição de medição é visualizado o forte decaimento, além de ser dependente no número de Froude (Fr_1).

Exatamente na posição $\Gamma = 1$, notam-se dois comportamentos distintos, a destacar: para os dados respectivos à $Fr_1 = 7,12$ e $Fr_1 = 8,51$, observa-se a ocorrência de um leve aumento das flutuações em torno da posição $\Gamma = 2$, para depois diminuírem até o valor $\chi = 0,8$ onde, a partir da posição $\Gamma = 5$, permanecem. Para as condições em que $Fr_1 = 10,35$ e $Fr_1 = 12,12$, não ocorre o aumento da flutuação de pressão. Apenas segue diminuindo, atingindo um mínimo em torno da posição $\Gamma = 3$. A partir da posição $\Gamma = 5$, atingem o valor de $\chi = 0,8$. A diferença entre estes comportamentos resulta, possivelmente, da diferença de espessura do colchão d'água, onde os menores h estão associados aos menores Fr_1 .

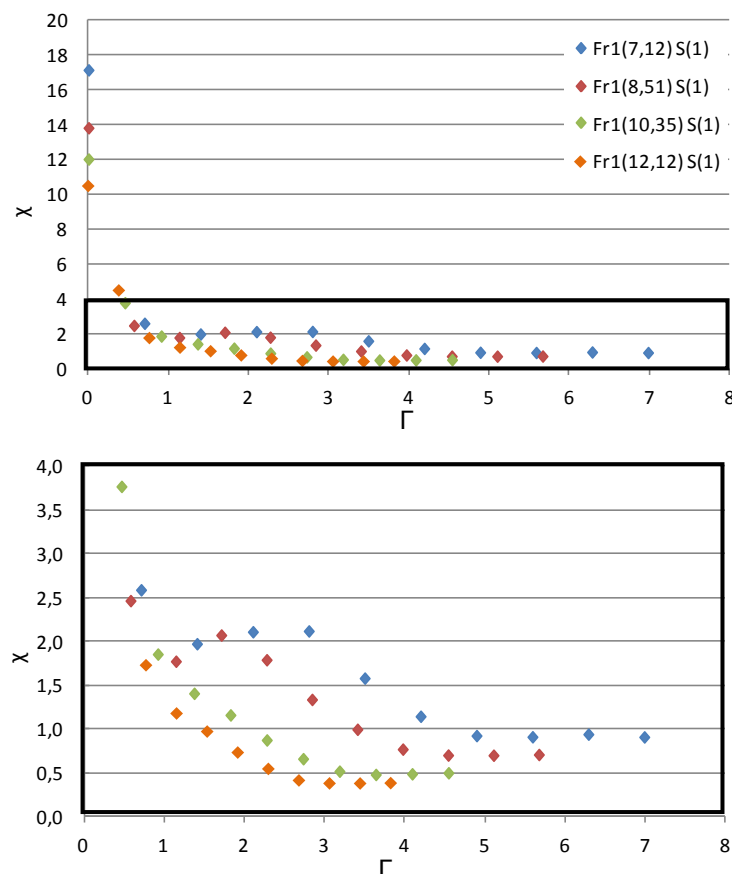


Figura 81 - Flutuações de pressão adimensionalizadas para submergência 1.

As figuras na sequência, Figura 82 e Figura 83, apresentam a comparação entre as flutuações de pressão provocadas pela incidência do jato vertical com as flutuações associadas ao escoamento a jusante dos vertedouros em questão.

Os dados relativos à presente pesquisa, no que corresponde ao comportamento do adimensional de flutuação de pressão obtido para os dados de Dai Prá (2011), parece não corresponder a um mesmo fenômeno.

Embora inexista curva de concordância no modelo utilizado por Novakoski (2016), e portanto, admita-se o impacto de um jato sob o canal sob um ângulo de $53,18^\circ$. Não foi identificado correspondência entre os dados da presente pesquisa.

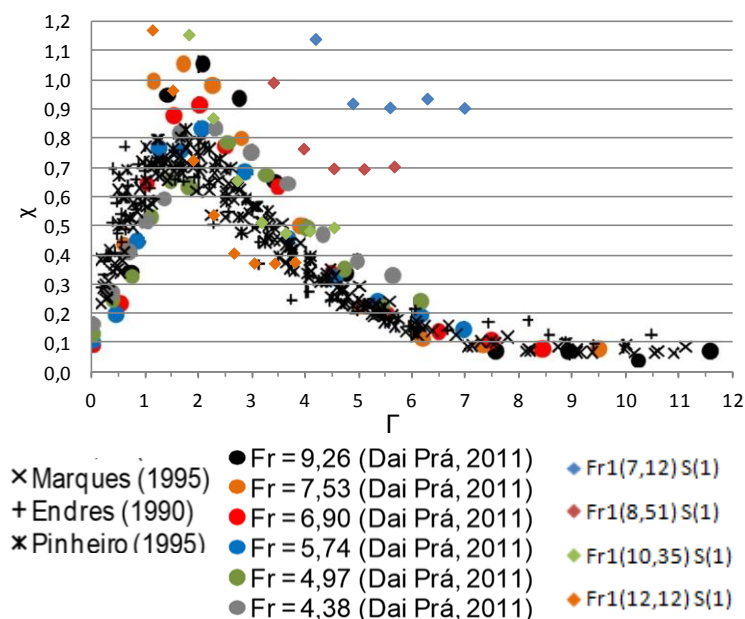


Figura 82 - Flutuações de pressão adimensionalizadas comparadas com as flutuações no ressalto hidráulico a jusante de vertedouro de calha lisa.

(adaptado de DAI PRÁ, 2011)

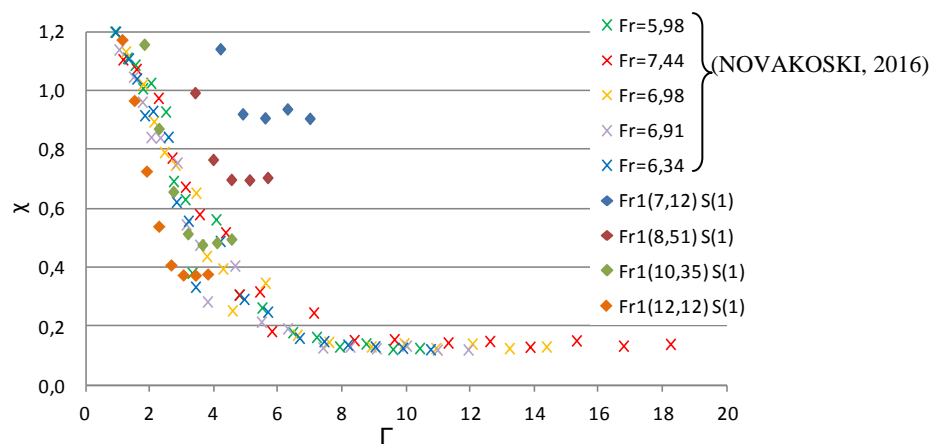


Figura 83 - Flutuações de pressão adimensionalizadas comparadas com as flutuações no ressalto hidráulico a jusante de vertedouro em degraus sem curva de concordância.

(adaptado de NOVAKOSKI, 2016)

No aspecto dos coeficientes de assimetria, percebe-se que os comportamentos obtidos no canal a jusante do impacto do jato assemelham-se aos dos pesquisadores. Na Figura 84, com os coeficientes de assimetria publicados por Dai Prá (2011), e na Figura 85, com os publicados por Novakoski (2016).

A comparação teve maior êxito quando associados aos resultados de Dai Prá (2011), quando comparados aos dados de Novakoski (2016) verifica-se maior dispersão. A partir da posição 3, os coeficientes apresentam, praticamente, o mesmo resultados nos três casos.

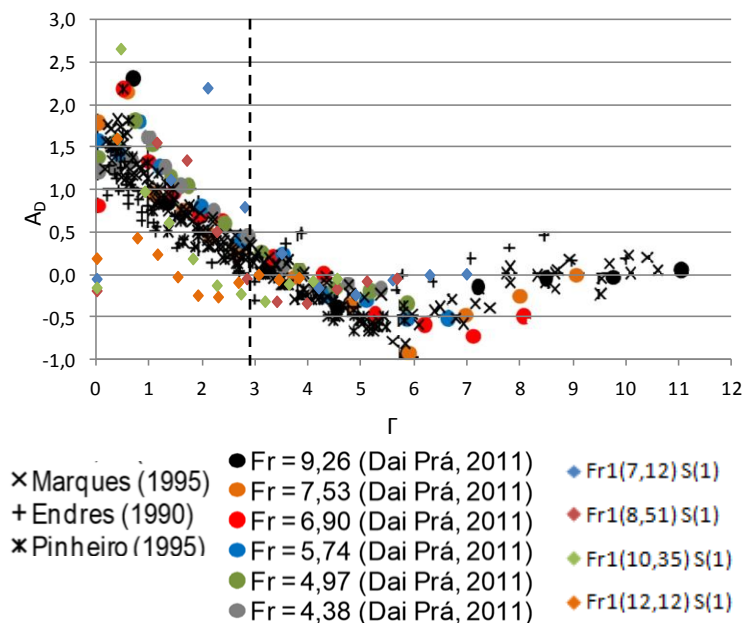


Figura 84 - Comparação entre os coeficientes de assimetria obtidos para o impacto do jato vertical com os obtidos a jusante de vertedouro de calha lisa, com curva de concordância.

(adaptado de DAI PRÁ, 2011)

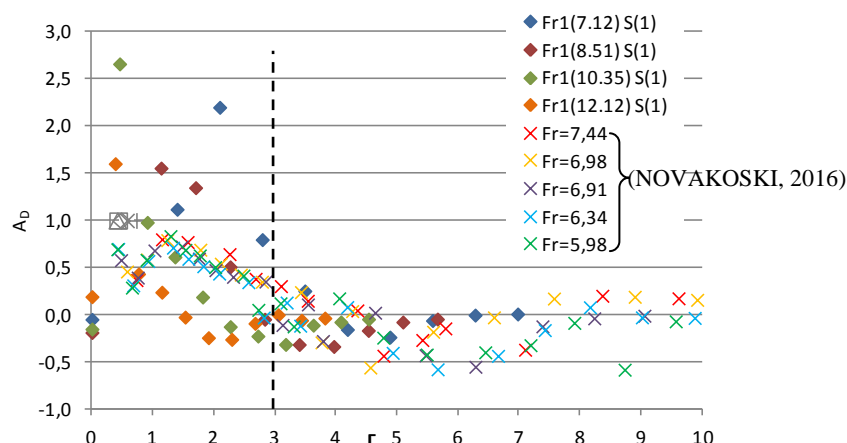


Figura 85 - Comparação entre os coeficientes de assimetria obtidos para o impacto do jato vertical e para o ressalto hidráulico a jusante de vertedouro em degraus sem curva de concordância.

(adaptado de NOVAKOSKI, 2016)

6 CONCLUSÕES

A caracterização do escoamento provocado pelo jato vertical se deu mediante a coleta de amostras de pressão, com o auxílio de transdutores de pressão instalados no fundo do canal. A frequência de amostragem foi de 128 Hz, durante 10 minutos, totalizando 78600 dados para cada par Vazão - Submersão.

i. Comprimento do núcleo e comprimento do jato submerso

A primeira análise se deu mediante as recomendações de Horení (1956), Hartung e Häusler (1973), Ervine et. al. (1997) e Castillo (2002) para a caracterização do comprimento do núcleo do jato. O resultado obtido, à exceção da recomendação de Horení (1956), indica um valor, próximo, de 0,10 m como comprimento do núcleo do jato.

Há que se pontuar que, embora os resultados tenham apresentado boa correspondência entre si, nenhuma das metodologias engloba a intensidade de turbulência inicial ou energia, parâmetros que, segundo a bibliografia consultada, são importantes na dimensão do jato.

O cálculo do comprimento do jato submerso foi feito seguindo a proposta de Cola (1965). O autor propõe que o comprimento do jato submerso seja 8 vezes o comprimento do núcleo. No entanto, não há recomendação no que tange ao cálculo do núcleo. Utilizando as recomendação de Hartung e Häusler (1973) e Ervine et. al. (1997), para o cálculo do núcleo, atreladas à proposta de Cola (1965), o comprimento do jato submerso mede entre 0,80 m e 1,20 m.

A espessura mínima para o colchão da água partiu de Martins e Viseau (1994). Os autores sugerem que a espessura mínima do colchão d'água seja 14 vezes a espessura mínima do jato ou, alternativamente, 1,5 vezes a altura crítica do escoamento. Utilizando $1,5 h_{CR}$, nenhum dos testes apresentou espessura suficiente. Atendendo ao segundo critério, tem-se espessuras entre 0,355 m a 0,616 m, as quais dependem do n° de Froude associado ao grau de submersão.

ii. Largura de Influência do Jato

Dentre as propostas e análises efetuadas, a zona de impacto do jato é melhor definida partindo do ângulo de espalhamento do jato. Sendo assim, relacionou-se a largura de influência do jato, com a altura de queda do jato. Recomenda-se, portanto, o uso do gráfico e da equação obtidos neste trabalho, os quais relacionam o adimensional de pressão C_p com a razão entre a largura de influencia e a energia potencial.

Estes resultados reforçam os publicados e recomendados por Beltaos (1976).

iii. O coeficiente adimensional de pressão (C_p)

No ponto de impacto, o adimensional apresenta o valor de 0,6, permanecendo constante até a posição $h/B_t = 5$, quando passa a decair de forma exponencial. Neste caso, 60% da energia total é dissipada no núcleo do jato e na queda livre.

Outro ponto a destacar é que graus de submergência menores que 1, não promovem de forma adequada a dissipação de energia, logo o amortecimento é inexistente. Além disso, o aumento de meio grau na submergência (1 para 1,5) diminui pela metade o alcance das pressões dinâmicas. Entretanto, utilizando-se o mesmo incremento (+0,5), passando de 1,5 a 2, o alcance das pressões teve menor sensibilidade, indicando que o alcance das pressões dinâmicas não varia de forma linear com o aumento da espessura do colchão d'água.

Estes resultados podem, ainda, relacionar a razão entre a pressão dinâmica máxima e a energia máxima ($P_{dmáx}/E_{MÁX}$) com a razão entre a espessura do colchão d'água e a altura crítica do escoamento (h/h_{cr}). Disto, conclui-se que a espessura mínima do colchão d'água para promover o amortecimento das pressões deve ser $h \geq 3 \cdot h_{cr}$. Vale lembrar que este valor é o dobro do recomendado por Matins e Viseau (1994).

iv. O coeficiente adimensional de flutuação de pressão C_p'

O máximo valor do desvio padrão das flutuações de pressão ocorre para profundidades de colchão com cerca de quatro vezes e meio a dimensão transversal do jato retangular ($4,5 B_t$) no ponto de impacto do jato.

A jusante do ponto de impacto, ao longo do canal, as flutuações de pressão diminuem à medida que o colchão aumenta. Neste caso, coeficiente C_p' se aproxima mais rapidamente de zero com o aumento do número de Froude (Fr_1). A partir da posição $y=3h$, o coeficiente de flutuação concentra-se em torno de zero.

- v. O coeficiente de assimetria (A_D), coeficiente de curtose (A_k) e o coeficiente estatístico de probabilidades (N)

Os coeficientes de assimetria, no ponto de impacto do jato, resultaram em valores negativos para os ensaios com grau de submergência igual a 1. À medida que a submergência cresce, os coeficientes tornam-se positivos.

Na porção longitudinal do canal, mais especificamente na posição $y = 1,5h$, ocorre o descolamento do escoamento do contorno sólido, apontado pela passagem dos valores de positivos para negativos. Decorre, ainda, que as situações com menor grau de submergência permitem a ocorrência de subpressões com maior alcance. Já para colchões mais espessos, além do alcance ser menor, a magnitude das subpressões são menores, em módulo.

No que tange à análise do coeficiente de Curtose, tem-se valores positivos, indicando uma função mais achatada, relacionada a maiores flutuações de pressão.

No caso de pressões extremas, 0,1%, 0,01% e 99,9%, o coeficiente N , na posição $y \leq 1h$ apresenta comportamento diferenciado em função da zona de impacto do jato. Para as demais probabilidades este aumento não ocorreu. Para $y > 1h$ o coeficiente manteve-se constante para cada probabilidade e independe o grau de submergência e do número de Froude (Fr_1), sendo considerado constante para cada probabilidade avaliada.

Partindo da análise desses momentos estatísticos, conclui-se que o escoamento a jusante do ponto de impacto pode ser dividido em quatro zonas distintas, a destacar:

- Zona I - Região do impacto ($0 \leq y/h \leq 1$). As maiores pressões e as maiores flutuações de pressão caracterizam a zona.
- Zona II - Região de reflexão ($1 < y/h \leq 2$). Região de subpressões. Descolamento do escoamento do contorno sólido.

- Zona III - Região de acomodação ($2 < y/h \leq 5$). As pressões dinâmicas tem pequena magnitude, bem como suas flutuações. Embora, negativos, os coeficientes de assimetria crescem continuamente.
- Zona IV - Fim da influência do jato ($y/h > 5$). Não há registro de pressões dinâmicas, as flutuações de pressão concentram-se em torno de zero. O coeficiente de assimetria tende a zero, indicando uma distribuição normal de pressões.

vi. Análise Espectral

O espectro das flutuações de frequências apresenta, para o grau de submergência unitário, decaimento de energia de forma mais suave e decaimento mais intenso para os graus de submergência maiores que 1, indicando que, de fato, o aumento da espessura do colchão d'água tem papel importante na dissipação de energia do escoamento.

Além disso, para os graus de submergência maiores, é possível visualizar dois decaimentos: um mais suave para $St < 0,5$ e outro mais acentuado para $St > 5$.

Em nenhuma circunstancia foi possível identificar decaimentos da ordem de $-5/3$, valor atrelado à região do equilíbrio universal.

vii. Considerações acerca da utilização dos adimensionais clássicos utilizados na caracterização do ressalto hidráulico

Um dos objetivos da pesquisa foi a adoção dos parâmetros adimensionais utilizados nos estudos de ressaltos hidráulicos para caracterizar o escoamento a jusante de um jato vertical em um canal com fundo plano.

Sumariamente, o comportamento do adimensional ψ relativo ao jato vertical guarda vaga semelhança com o comportamento dos demais escoamentos. A ausência da curva de concordância no modelo utilizado por Novakoski (2016), portanto admitindo como o impacto de um jato sob um ângulo $53,18^\circ$ no fundo do canal, não concebeu resultados diferentes daqueles obtidos por Dai Prá (2011), sobretudo sob as perspectivas adotadas na presente pesquisa.

A comparação, no que corresponde ao comportamento do adimensional de flutuação de pressão obtido para os dados de Dai Prá (2011) e Novakoski (2016), aparenta não corresponder a um mesmo fenômeno.

No aspecto dos coeficientes de assimetria, percebe-se que o comportamento obtido nos três modelos assemelha-se, sobretudo a partir da posição $\Gamma = 3$, quando os coeficientes apresentam os mesmos valores.

O ressalto hidráulico, conforme Lopardo (1986), Baptista et.al., (2011), entre outros, corresponde à mudança de regime de uma profundidade menor que a crítica para outra maior, ou seja, a transição do regime rápido ($Fr > 1$) para o regime lento ($Fr < 1$). Sendo assim, é pertinente a paridade do escoamento provocado pelo jato com formação de um ressalto hidráulico, à medida que ocorre a mudança de regime de rápido para lento.

Contudo, a análise dos parâmetros ψ , χ e A_D , escopo da presente pesquisa, verificou que tais critérios imputados ao escoamento abordado são insuficientes para admitir maior semelhança do ponto de vista cinético e dinâmico com a formação do ressalto hidráulico em bacias de dissipação.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando a continuidade dos estudos sobre os escoamentos provocados pela incidência de jatos, citam-se alguns temas a serem investigados, tanto para agregar novos conhecimentos como para ratificar os resultados da presente pesquisa.

Desta forma, são sugestões:

- avaliação do escoamento provocado pela incidência de um jato com diferentes ângulos de impacto (0° a 90°);
- medir a intensidade de turbulência no ponto de lançamento do jato;
- medir a velocidade de lançamento do jato;
- contabilizar a perda de carga nas diferentes fases do escoamento à superfície livre;
- analisar graus de submersão entre 1 e 1,5;
- diminuir o espaçamento das tomadas de pressão no ponto de impacto do jato;
- aumentar o número de tomadas de pressão, alcançando distâncias maiores do ponto de impacto;
- abranger maior range de número de Froude (Fr_1);
- medir as alturas conjugadas, tanto a rápida (h_1) como a lenta (h_2), e averiguar o estabelecimento da equação de Bélanger.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAPTISTA, Márcio Benedito et al (Org.). **Hidráulica Aplicada**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2011. 628 p.

BELTAOS, S. **Oblique impingement of plane turbulent jets**. J.HYDR.DIV., ASCE, v.102, Ser.HY, n. 9. p.1177-1192. Sept. 1976

BELTAOS, S. e RAJARATNAM, N. **Impinging circular turbulent jets**. J. Hydr. Div., ASCE. v.100, Ser. HY, n.10. p. 1313 – 1328. Oct. 1974.

BOHER, J. G.; ABT, S. R., WITTLER, R. J. **Predicting plunge pool velocity decay of free falling rectangular jet**. Journal of Hydraulic Engineering.10, p. 1043-1048. 1998.

BOLLAERT, E. **Transient water pressures in joints and formation of rock scour due to high-velocity jet impact**, Communication No. 13, Laboratory of Hydraulic Constructions, EPFL, Switzerland, 2002.

BORJA, João Gerdau de. **Considerações sobre dissipação de energia a jusante de vertedouros salto esqui**. 322 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012

BRASIL. PORTAL BRASIL. (Ed.). **Matriz energética**. 2014. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2010/11/matriz-energetica>>. Acesso em: 03 mar. 2016.

CANELLAS, Alba *et al.* Características das flutuações de pressão a jusante de dissipadores tipo concha com ângulo de 45°. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p.134-142, 25 fev. 2016. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p134-142>.

CARVALHO, P. A.; NIECKELE, A. O. **Jato Incidente a uma Placa**. 2008. Disponível em: <http://www.puc-rio.br/Pibic/relatorio_resumo2008/relatorios/ctc/mec/mec_pedrocunha.pdf>. Acesso em: 08 mar. 2016.

CASTILLO, L. G. **Metodología experimental y numérica para la caracterización del campo de presiones en los dissipadores de energía hidráulica**. Aplicación al vertido libre en presas bóveda. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya (Espana), 214 f., 1989.

CASTILLO, E. L. G. **Parametrical analysis of the ultimate scour and mean dynamic pressures at plunge pools.** In: International Workshop on Rock Scour due to High-velocity Jets. 2002, Lousanne. Proceedings of International Workshop on rock scour due to high-velocity jets. Lisse: Schleiss-bollaert, 2002. v. 1, p. 1 - 11.

CASTILLO, E. L. G. **Aerated jets and pressure fluctuation in plunge pools.** 2006. Philadelphia. 7th Int. Conf. on Hydrosience and Engineering (INCHE2006), Sept.

CHANSOON, H. **Air Bubble Entrainment in Free-surface Turbulent Flows: Experimental Investigations.** Report CH46/95, Dept. of Civil Engineering, University of Queensland, Australia, June, 368 pages, 1995.

CHANSOON, H. BRATTBERG, T. **Entrainment, dispersion and diffusion of air bubbles by plunging water jet.** In: International Conference on Multiphase Flow, 3. 1998, Lyon. p. 8 - 12.

CHANSOON, H.; AOKI, S.; HOQUE, A. **Similitude of air bubble entrainment and dispersion in vertical circular plunging jet flows:** An experimental study with freshwater, salty freshwater and seawater. Coastal/Ocean Engineering Report, No. COE02-1, Dept. of Architecture and Civil Eng., Toyohashi University of Technology, Japan, 2002, 94 p.

COLA, R. **Energy Dissipation of High Velocity Vertical Jet Entering a Basin.** Proceedings of the 11th IAHR. Congress, Leningrad. 1965.

DAI PRÁ, M. **Uma abordagem para determinação das pressões junto ao fundo de dissipadores de energia por ressalto hidráulico.** Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, 208 f., 2011.

ERVINE, D. A. The entrainment of air in water. Inter. Water Power and Dam Constr., n. 12, p. 27 – 30, Dec. 1976.

ERVINE, A.; FALVEY, H. T. **Behaviour of turbulent water jets in the atmosphere and in plunge pools.** Paper 9136, Water Eng. Group, Proc. of the Institution of Civil Engineers, 1987, Part 2, Vol. 83, pp. 295-314.

ERVINE, A.; et al. (1997). **Pressure fluctuations on plunge pool floors.** Journal Hydraulic Research, 35(2): 257-279.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 1998. 662 p.

GOLDSTEIN, R. J.. **Fluid Mechanics Measurements**. New York: Springer Verlag, 1983. Chapter ten - Acquiring and processing turbulent flow data. Simon, T. W.

GUTAMARK, G. W., WOLFSHTEIN, M., WYGNANSKI, I. **The plane turbulent impinging jet**. Journal of Fluid Mechanics. 88. 4. p. 737 – 756. 1978.

HAGER, W. H. **Energy Dissipators and Hydraulic Jump**. v.8. ed. London: Kluwer Academic Publishers, 1992. 289 p. (Water Science and Technology Library).

HARTUNG, F.; HÄUSLER, E. **Scours, stilling basins and downstream protection under free overfall jets at dams**. IN: CONGRESSO INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 11º, ICOLD, Madrid, Espanha, 1973. Transactions of the XI International Congress on Large Dams. Madrid: ICOLD, 1973. Question 41, Rep. 3, p. 39-56.

HINZE, J. O. **Turbulence**. 2 ed. New York: McGraw-Hill. p.790. 1975.

HORENI, P. **Desintegration of a Free Jet of Water in Air**. Sesit 93, 1956, Praha, Pokbaba.

KHATSURIA, R. M.. **Hydraulics of spillways and Energy Dissipators**. New York: Marcel Dekker, 2005. 649 p.

LENCASTRE, A. Descarregadores de lâmina livre: bases para o seu estudo e dimensionamento. Lisboa: LNEC, Memória 174. 137 f. 1961.

LENCASTRE, A.. **Descarregadores de Cheia: Com particular incidência em sobre dissipação de energia em Jactos Cruzados**. 1984. 228 f. Tese (Doutorado) - Curso de Hidráulica Aplicada, Universidade do Porto, Lisboa, 1984.

LOPARDO, R. A.; HENNING, R. E. Experimental advances on pressure fluctuations beneath hydraulic jumps. **Proceedings** 21st IAHR Congress, Vol.3, Melbourne. p. 633-638. (1985).

FIOROTTO, V.; RINALDO, A. Turbulent pressure fluctuations below hydraulic jumps. **Journal of Hydraulic Research** 30. p. 499-520.1992.

LOPARDO, R. A. Notas sobre fluctuaciones macroturbulentas de presion, medicion, analisis y aplicacion al resalto hidraulico. Curso n°1: **Turbulência, cavitation y airacion de fenomenos hidraulicos**. São Paulo, 1986.

MANSO, P. F. de A. **The influence of pool geometry and induced flow patterns in rock scour by high-velocity plunging jets**. Thèse présentée à la faculté Environnement naturel, architectural et construit (ENAC) pour l'obtention du grade de Docteur ès Sciences, 345 f., 2006.

MANSO, P. A.; BOLLAERT, E.; SCHLEISS, A. J. Influence of Plunge Pool Geometry on High-Velocity Jet Impact Pressures and Pressure Propagation inside Fissured Rock Media. *J. Hydraul. Eng.*, 135(10), 2009, p. 783–792.

MARQUES, M. G.; DRAPEAU, J.; VERRETE, J. L. 1996. **Análise da flutuação de pressão provocada pela formação de um ressalto hidráulico a jusante de vertedouro**. In. XVII Congresso Latino Americano de Hidráulica, 1996, Guayaquil. Memórias. Guayaquil: Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas. p. 1-11.

MARQUES, M. G. **Dissipadores de Energia – Notas de Aula**. Porto Alegre: Slide, 2010. 35 slides, color.

MARTINS, R., VISEU, T. Plunge pool slab design taking into account turbulent pressures. **IX ADP – IAHR**, Singapore. 1994.

MÖLLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. **Turbulência: Fundamentos**. IV Escola de Transição e Turbulência. Porto Alegre, RS, Brasil, 2004.

PEREIRA, G. M. **Projeto de Usinas Hidrelétricas passo a passo**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

PINTO, L. C. S. Estudo teórico-experimental das pressões dinâmicas desenvolvidas no fundo de pré-escavações a jusante de estrutura tipo Salto Esqui. Tese de Doutorado Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP, Brasil. 376 páginas, 1994.

PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos: Eesc Usp, 2006. 519 p.

PUERTAS, J. **Critérios hidráulicos para el diseño de cuencos de disipación de energia em presas bóveda com vertido livre por coronación**. Tesis presentada para la obtención del grado de Doctor pela Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona. 1994.

PUERTAS, J. DOLZ, J. **Plunge pool pressures due to a falling rectangular jet.** Journal of Hydraulic Engineering ASCE. Technical Notes. 404 - 407 p. 2005

RAMOS, C. Matias. **Estruturas de dissipação de energia por jatos cruzados:** Critérios de dimensionamento. Memória nº577. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 1982. 18 p. Ministério da Habitação, Obras Públicas e Transportes.

RAMOS, C. M. **Hydrodynamic actions on hydraulic structures.** LNEC-65/53/315. Lisboa, 1988.

REVISTA DO COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS: **Erosão em Bacias de Lançamento Aspectos Hidráulicos e Geotécnicos.** Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, n. 3, mar. 1996.

RODI, W. Turbulence models and their application in hydraulics: a state of the art review. IAHR. 104 f. Delft. 1980.

SOUZA, Francisco José de. Turbulência em escoamentos com partículas. **IX Escola de Primavera de Transição e Turbulência**, São Leopoldo. p.1-32, set. 2014.

TEIXEIRA, Eder Daniel. **Previsão dos valores de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico.** 113 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

TEIXEIRA, E. D. **Efeito de Escala na Previsão dos Valores Extremos de Pressão Junto ao Fundo em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico.** Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, 293 f., 2008.

TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. **A first course in turbulence.** Cambridge, MA: MIT Press. 1972.

TRIERWEILER NETO, Edgar Fernando. **Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta com diferentes graus de submersão.** 2006. 174 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

YUDITSKII, G. A. Pressões instantâneas no leito de jusante de barragens de grande altura com descarregador salto esqui. Lisboa: LNEC. Tradução, 521. 1985.

WIEST, R. A. Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro com diferentes graus de submergência. 2008. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

9 ANEXOS

9.1 ANEXO 01 - PRESSÕES MÉDIAS E DINÂMICAS BRUTAS

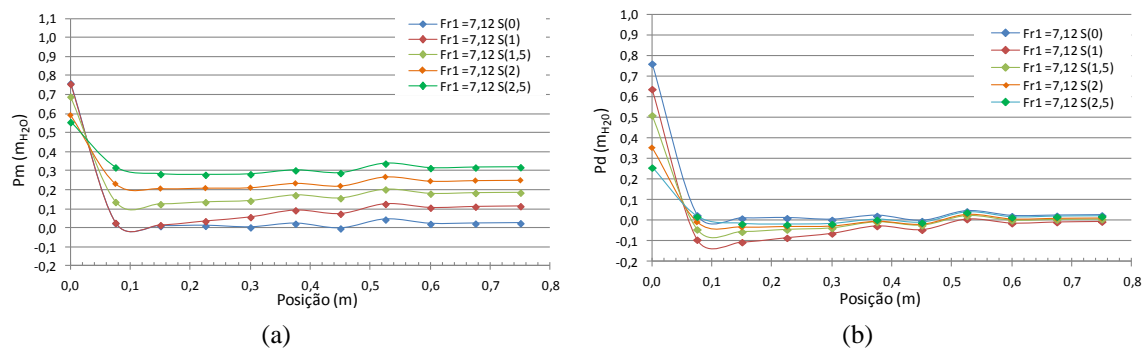


Figura 86 – Comportamento da pressão para $Fr_1 = 7,12$: (a) pressões médias (b) pressões média dinâmicas.

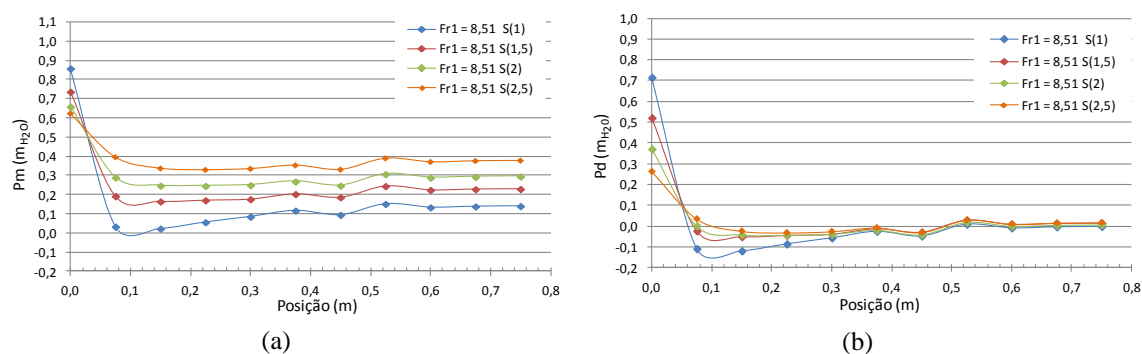


Figura 87 – Comportamento da pressão para $Fr_1 = 8,51$: (a) pressões médias (b) pressões média dinâmicas.

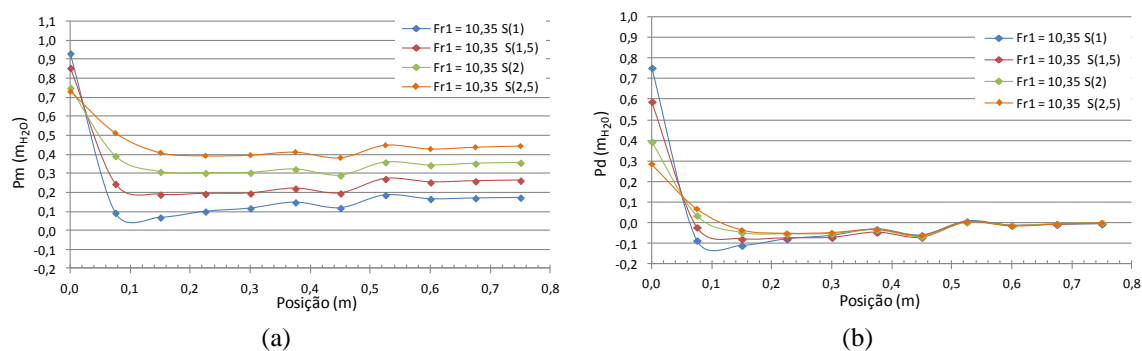


Figura 88 – Comportamento da pressão para $Fr_1 = 10,35$: (a) pressões médias (b) pressões média dinâmicas.

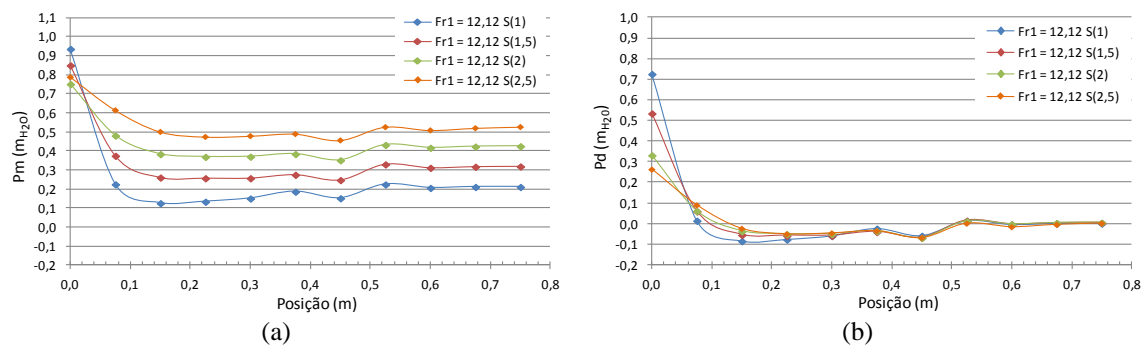


Figura 89 – Comportamento da pressão para $Fr_1 = 12,12$: (a) pressões médias (b) pressões média dinâmicas.

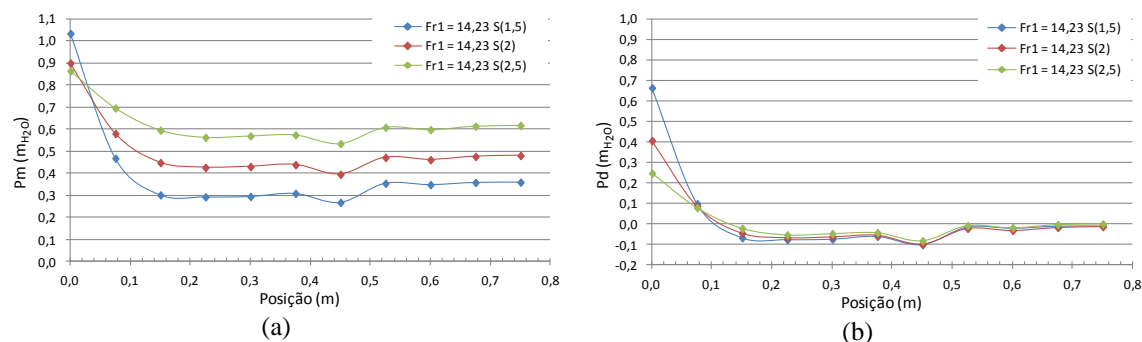
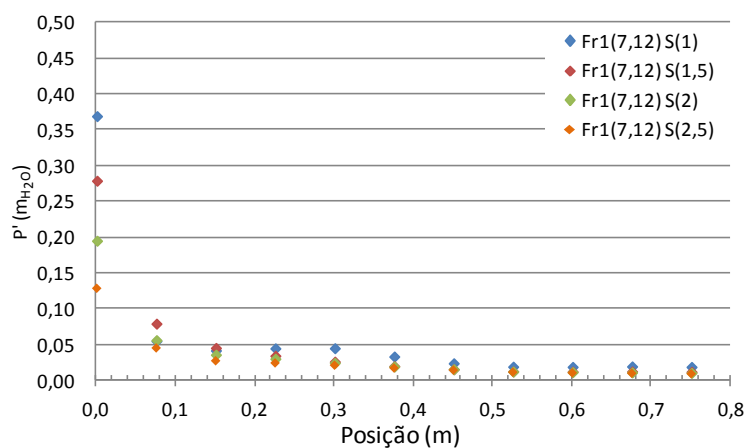
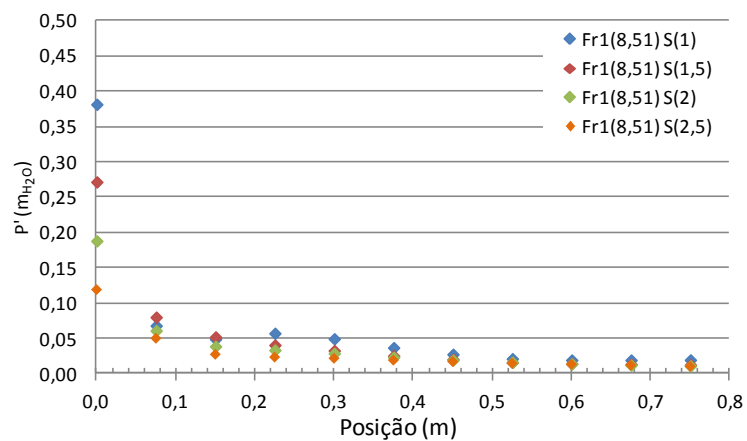


Figura 90 – Comportamento da pressão para $Fr_1 = 14,23$: (a) pressões médias (b) pressões média dinâmicas.

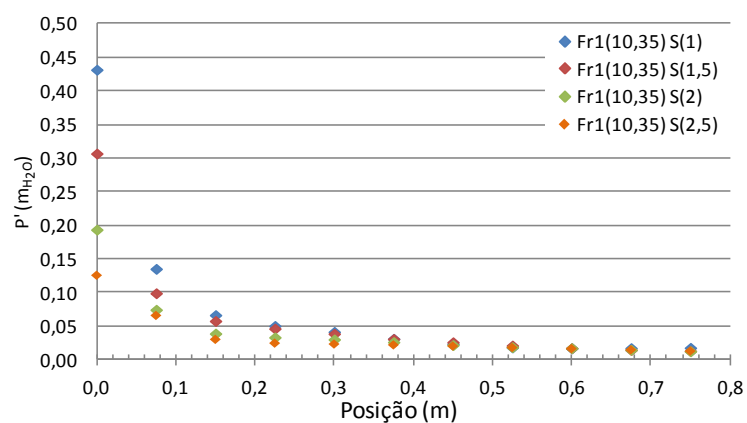
9.2 ANEXO 02 - COMPORTAMENTO DAS FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO



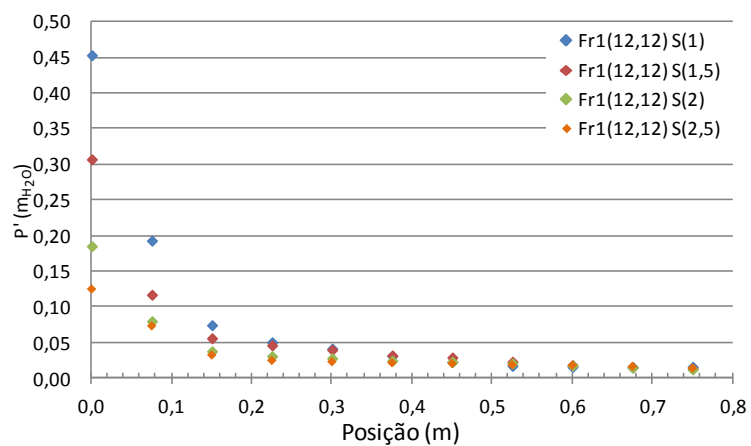
(a)



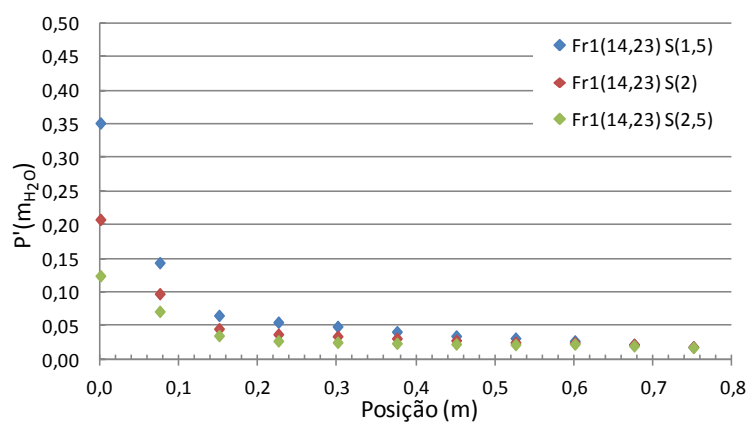
(b)



(c)



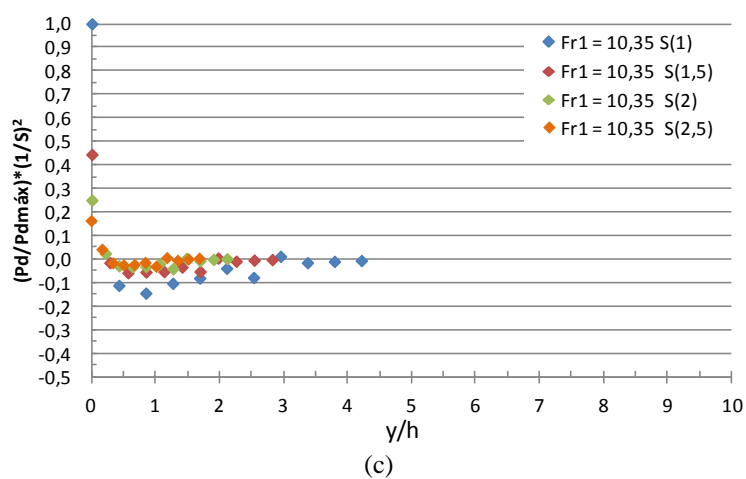
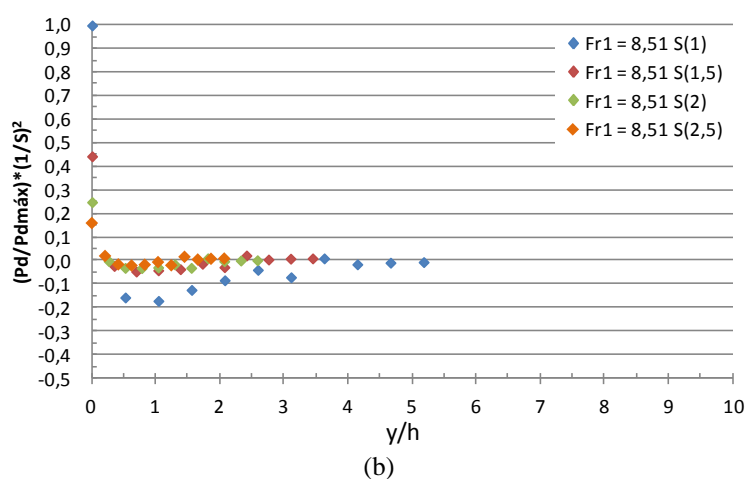
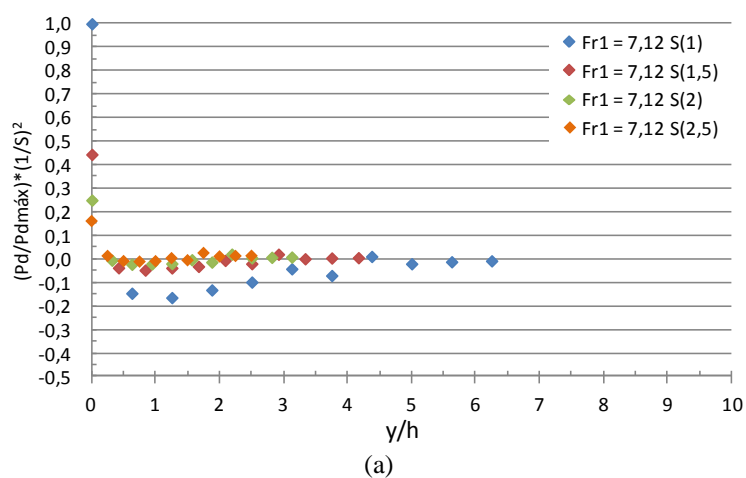
(d)

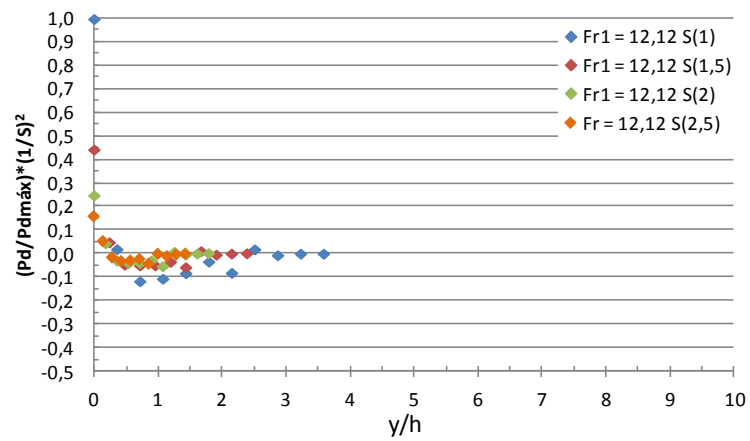


(e)

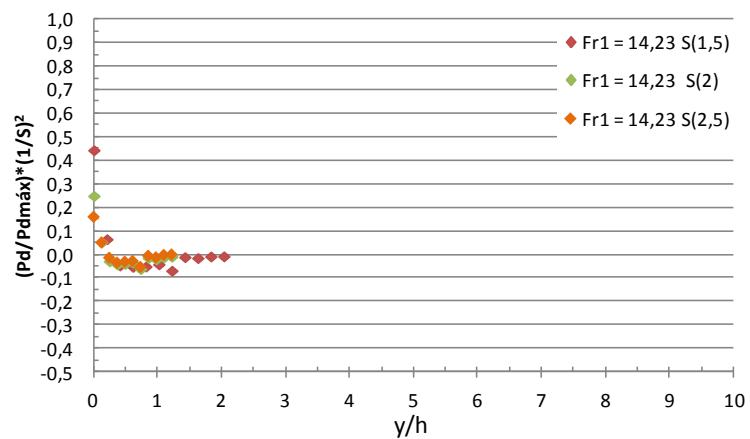
Figura 91 – Flutuações de pressão em função da distância do ponto de impacto: (a) $Fr_1 = 7,12$; (b) $Fr_1 = 8,51$; (c) $Fr_1 = 10,35$; (d) $Fr_1 = 12,12$ e (e) $Fr_1 = 14,23$

9.3 ANEXO 03 - COMPORTAMENTO DAS PRESSÕES ADIMENSIONALIZADAS EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO (y/h)





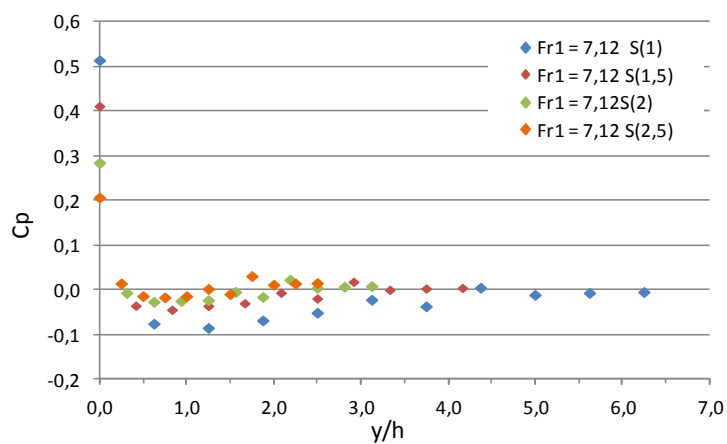
(d)



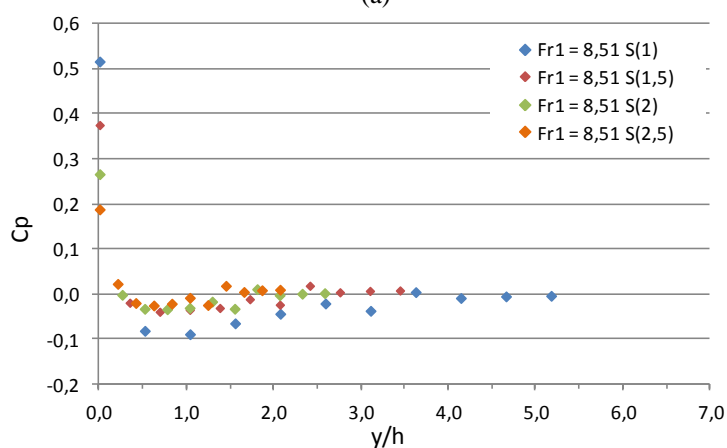
(e)

Figura 92 – Pressões dinâmicas adimensionais em função da relação entre a distância do ponto de impacto e a espessura do colchão d'água: (a) $Fr_1 = 7,12$; (b) $Fr_1 = 8,51$; (c) $Fr_1 = 10,35$; (d) $Fr_1 = 12,12$ e (e) $Fr_1 = 14,23$.

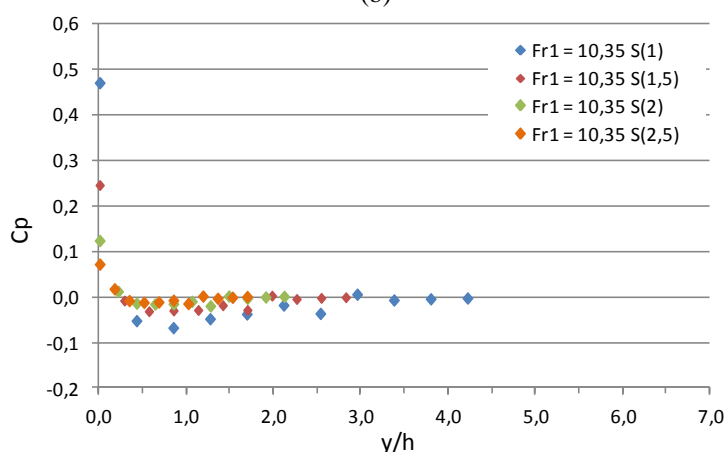
9.4 ANEXO 04 - COMPORTAMENTO DO COEFICIENTE DE PRESSÃO (CP) EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO (y/h)



(a)



(b)



(c)

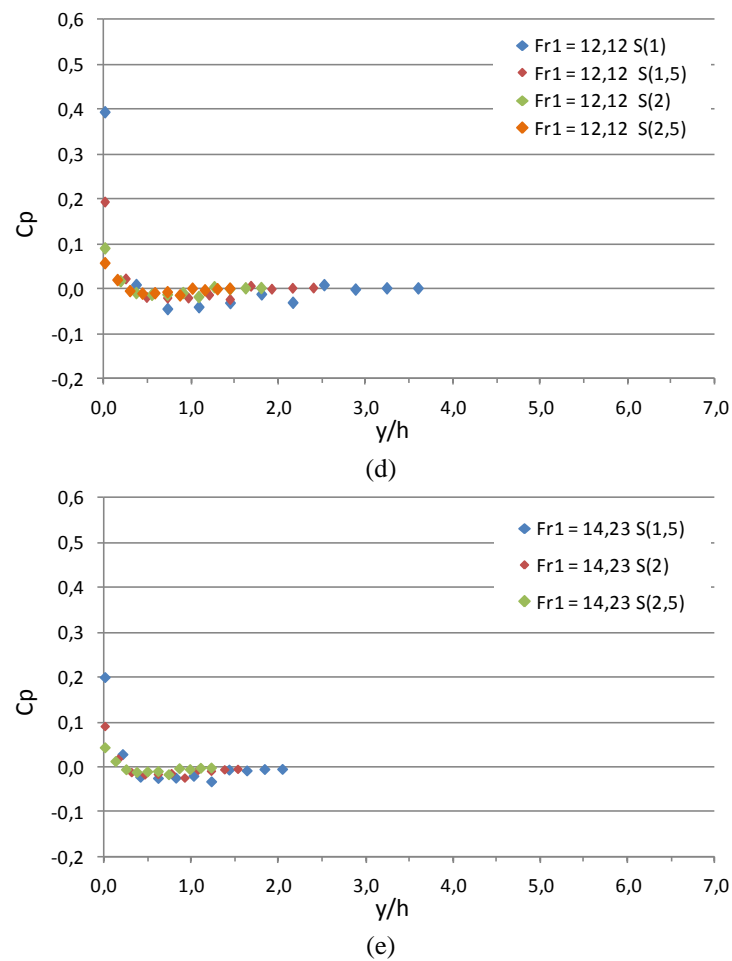
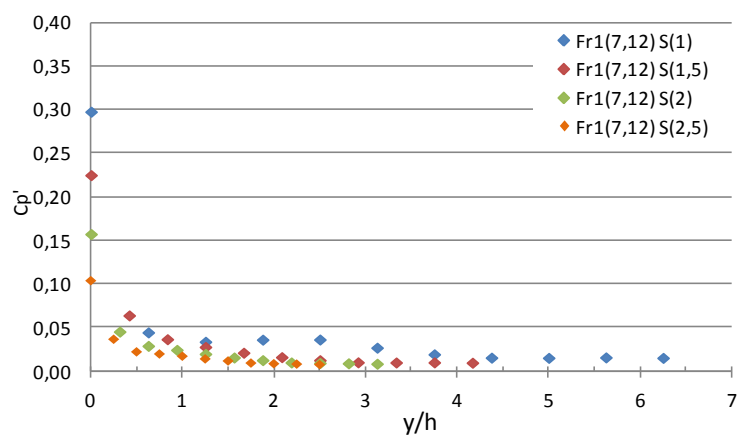
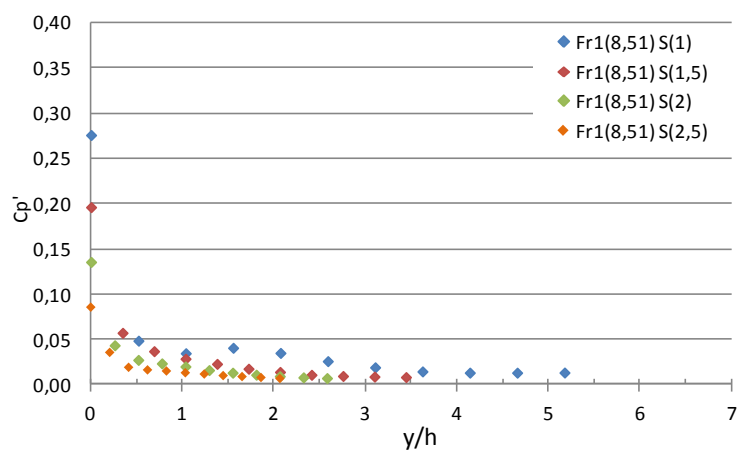


Figura 93 – Comportamento do coeficiente de pressão (C_p) em função da posição (y/h) para: (a) $Fr_1 = 7,12$; (b) $Fr_1 = 8,51$; (c) $Fr_1 = 10,35$; (d) $Fr_1 = 12,12$ e (e) $Fr_1 = 14,23$

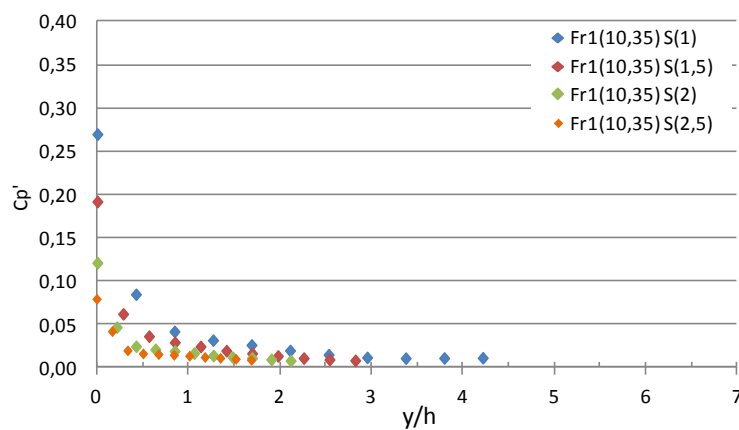
9.5 ANEXO 05 - COMPORTAMENTO DO COEFICIENTE DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO (C_p') EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO (y/h)



(a)



(b)



(c)

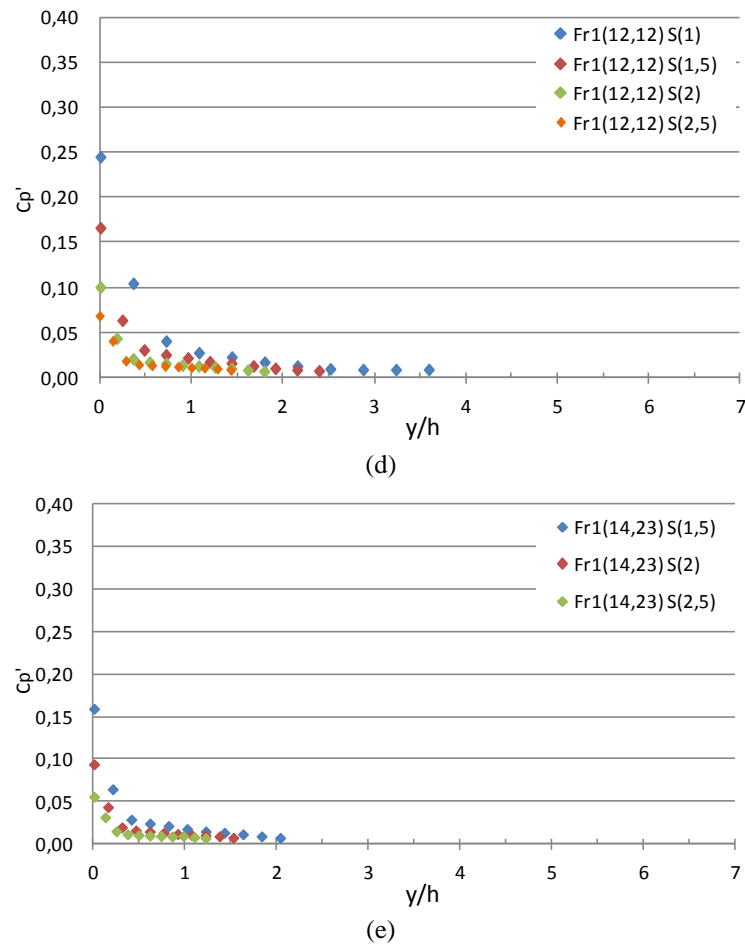
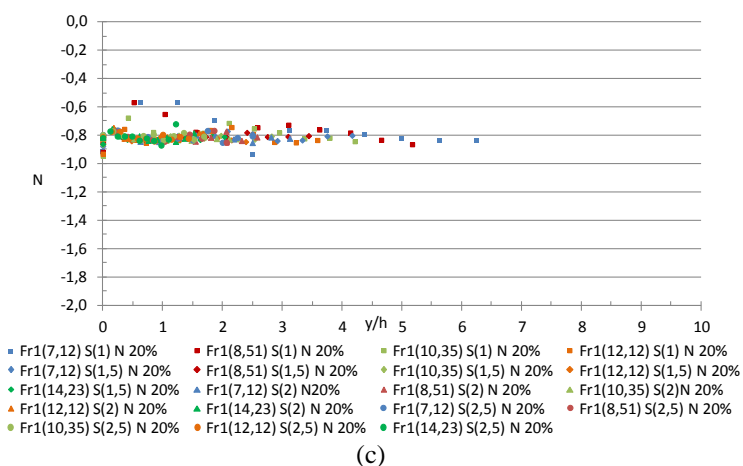
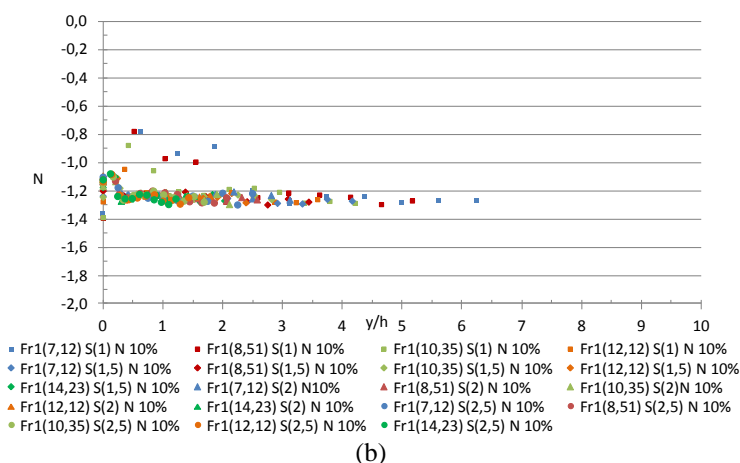
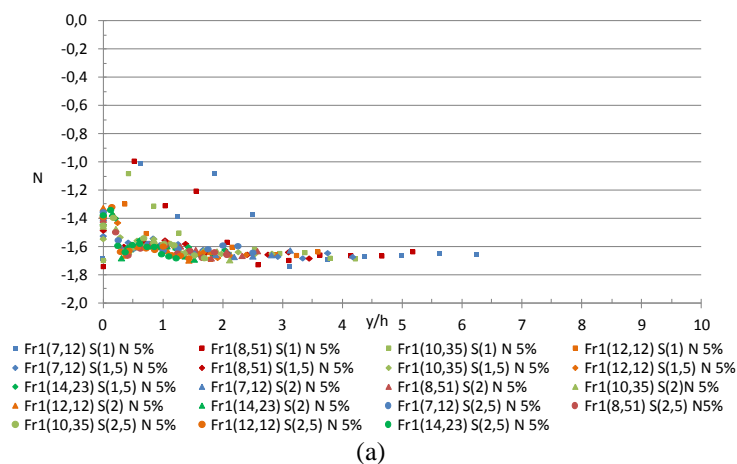
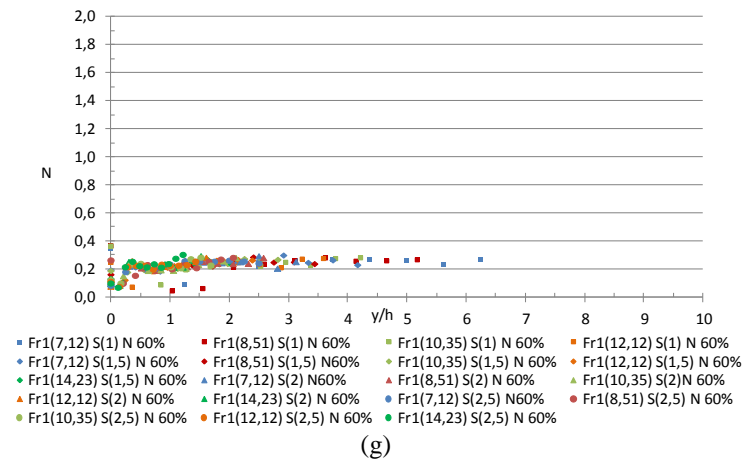
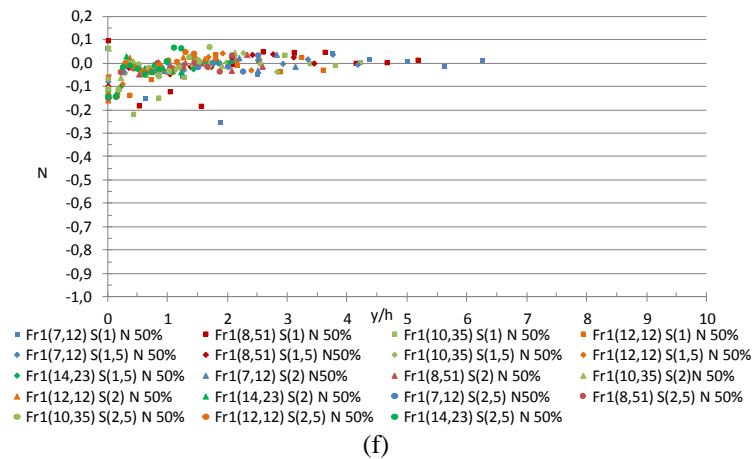
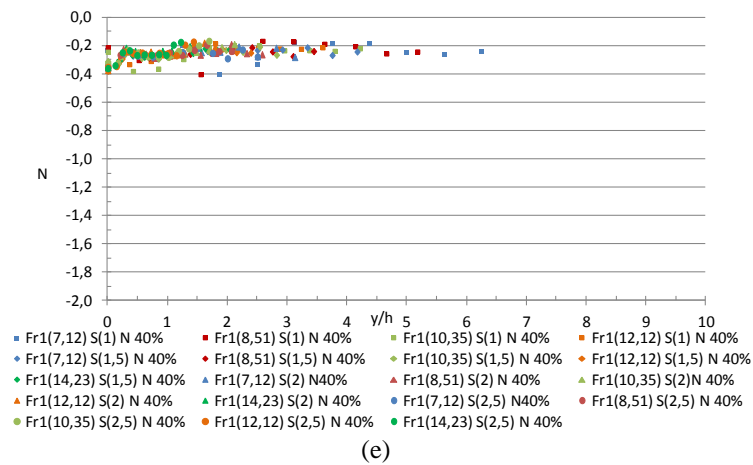
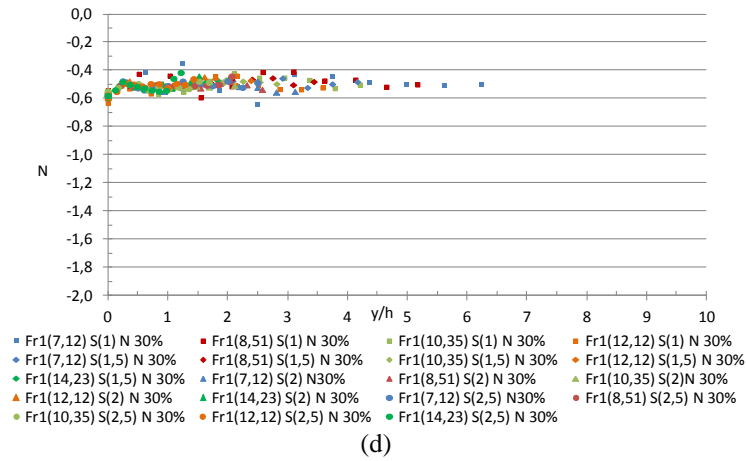
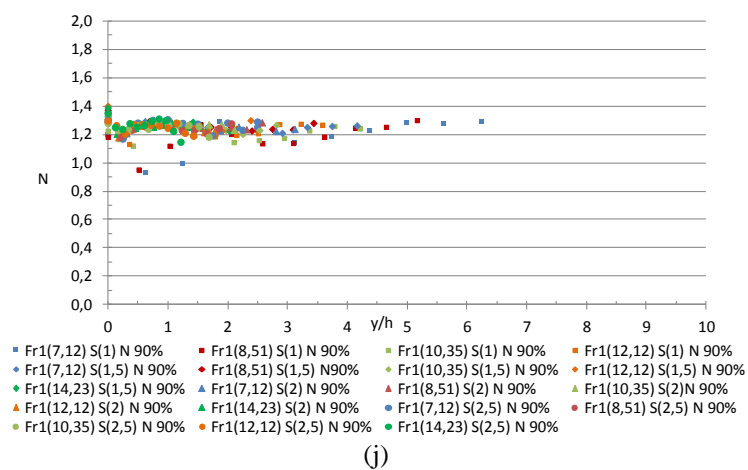
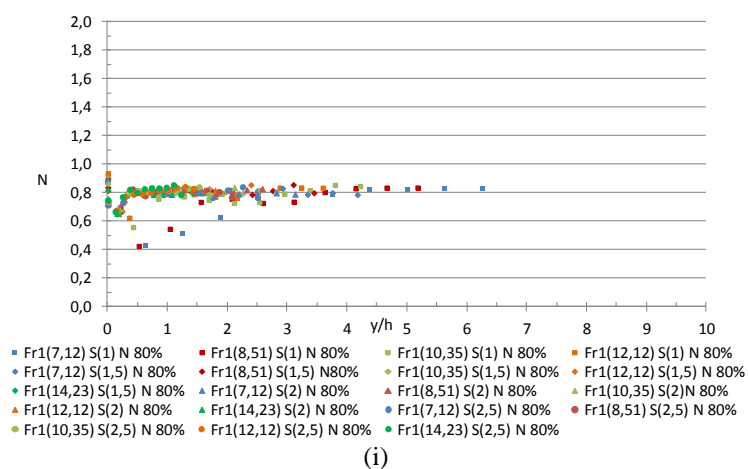
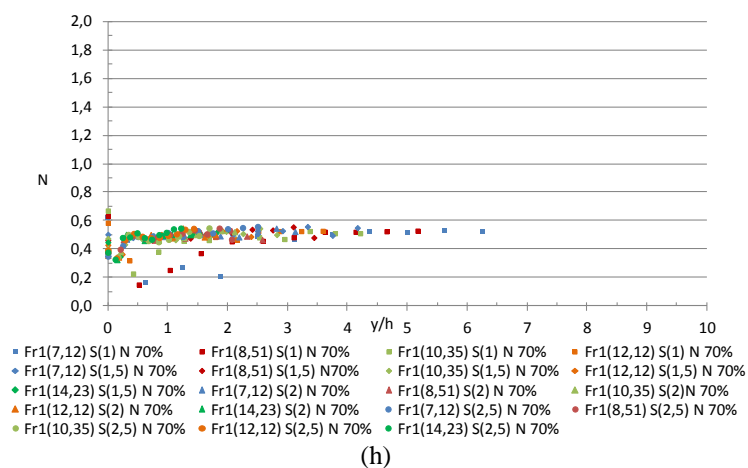


Figura 94 – Comportamento do coeficiente de flutuação de pressão (C_p') em função da relação y/h para: (a) $Fr_1 = 7,12$; (b) $Fr_1 = 8,51$; (c) $Fr_1 = 10,35$; (d) $Fr_1 = 12,12$ e (e) $Fr_1 = 14,23$.

9.6 ANEXO 06 - COMPORTAMENTO DO COEFICIENTE ESTATÍSTICO DE PRESSÕES N EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO (y/h)







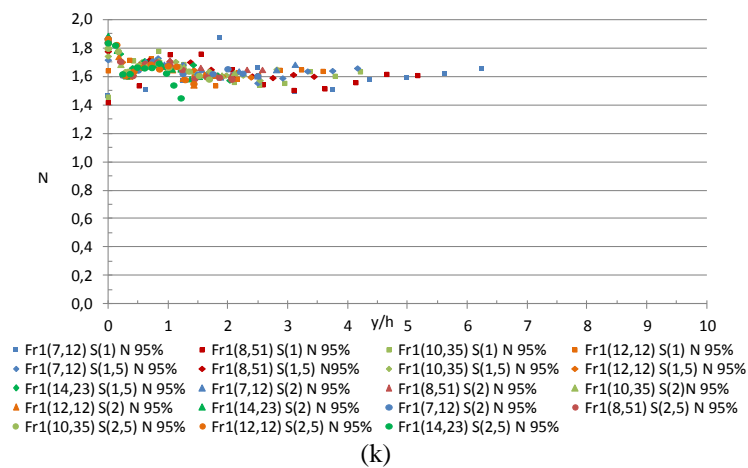
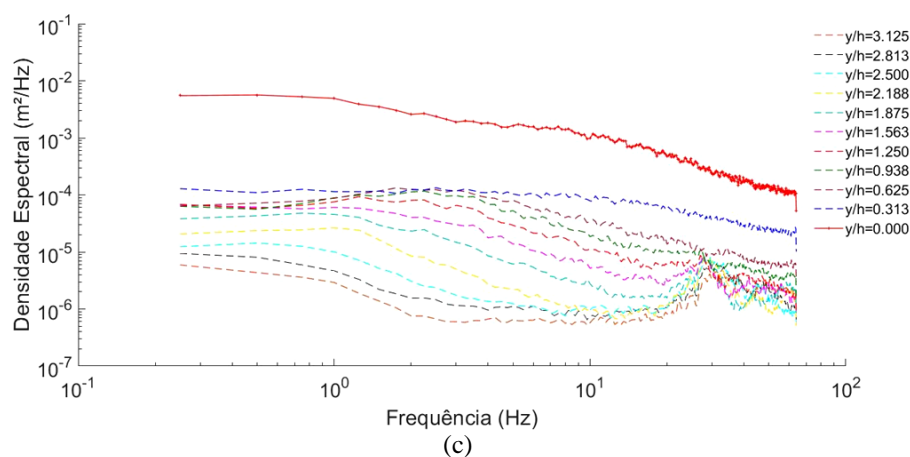
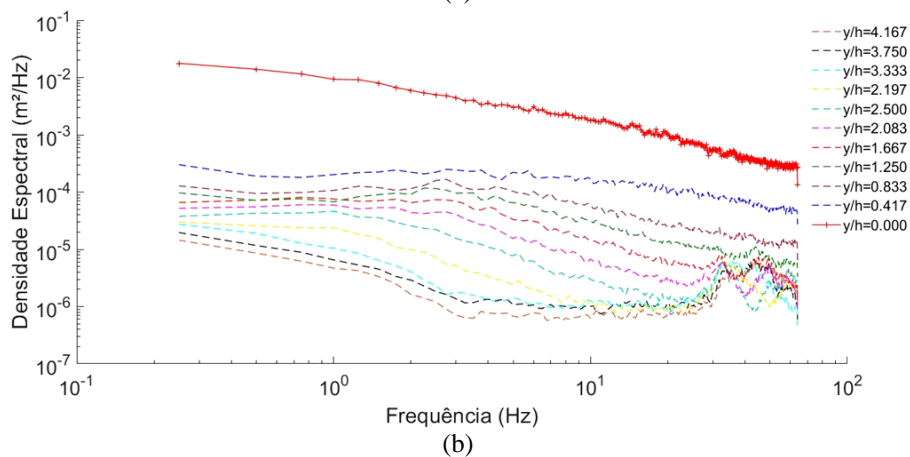
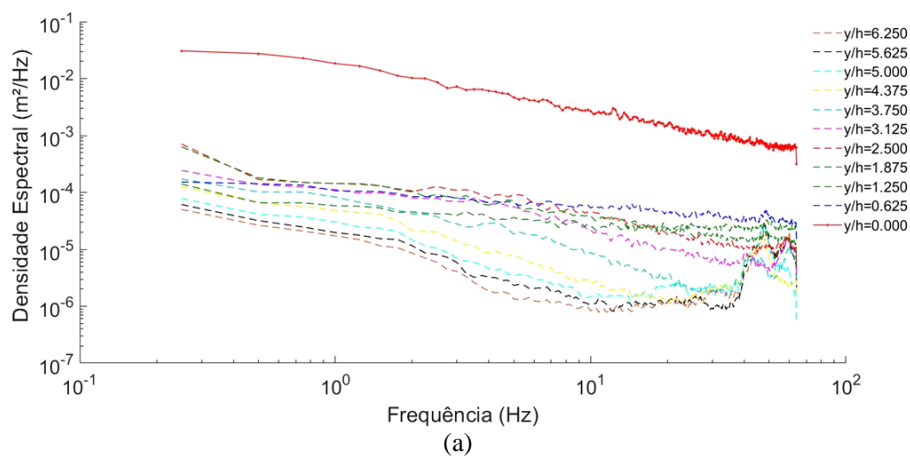


Figura 95 – Coeficiente estatístico de probabilidades (N) em função da relação y/h para: (a) 5%; (b) 10%; (c) 20%; (d) 30%; (e) 40%; (f) 50%; (g) 60%; (h) 70%; (i) 80%; (j) 90% e (k) 95%.

9.7 ANEXO 07 - ANÁLISE ESPECTRAL PARA AS TOMADAS DISTRIBUIDAS LONGITUDINALMENTE AO CANAL



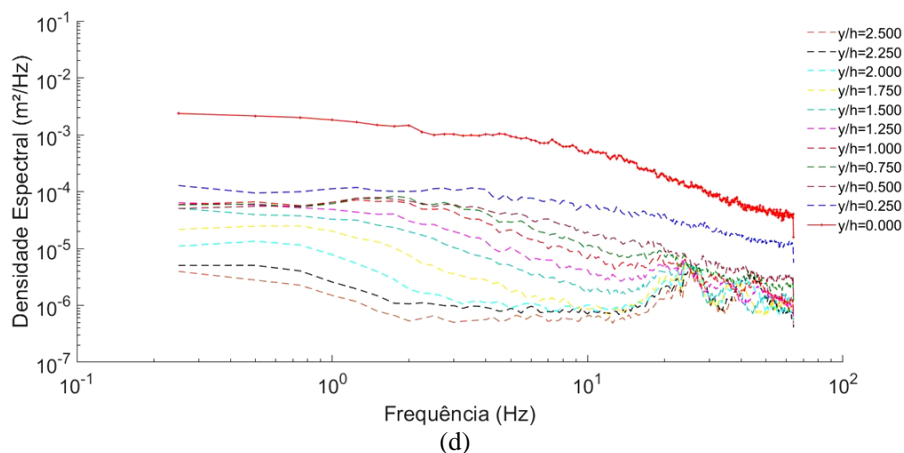
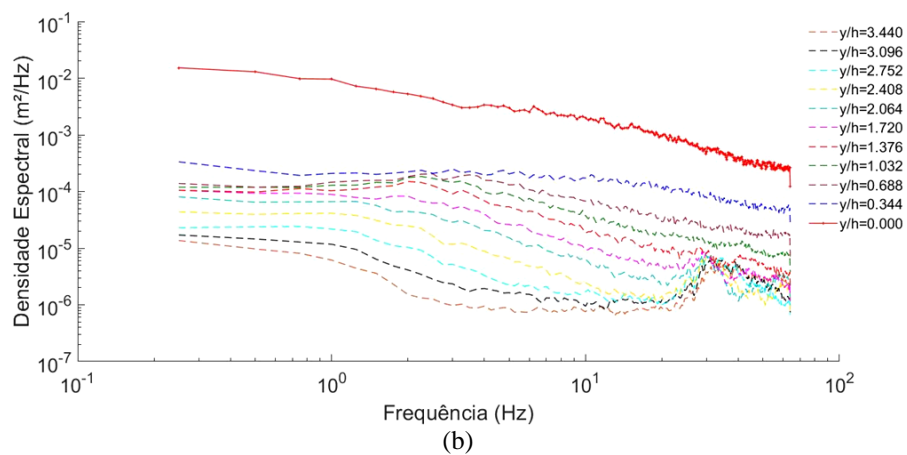
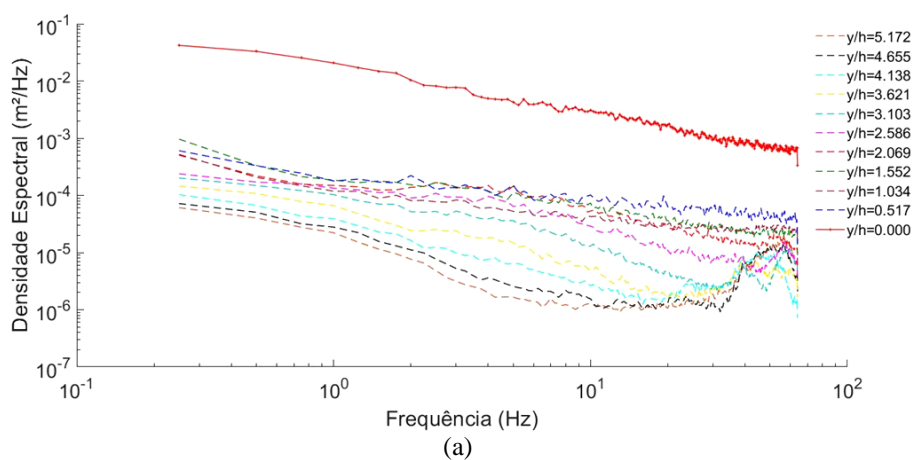


Figura 96 – Análise de frequências (não adimensionalizada) $Fr_1 = 7,12$; (a) $S=1.0$; (b) $S=1.5$; (c) $S=2.0$ e (d) $S=2.5$.



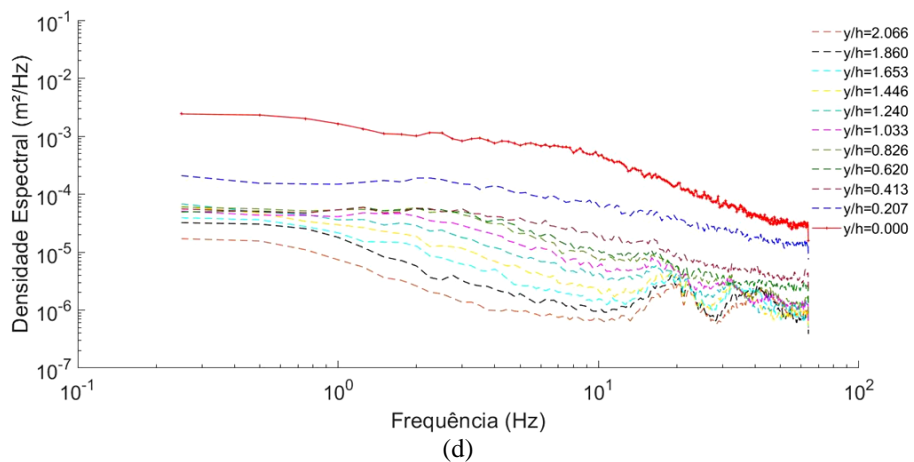
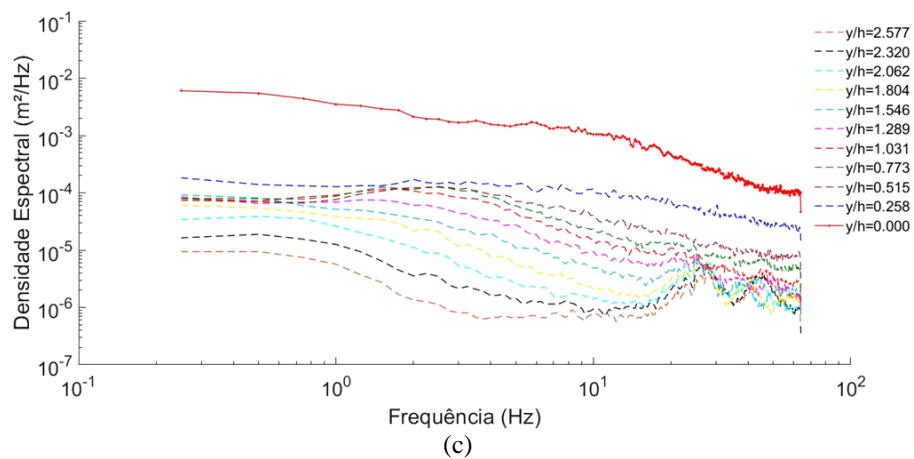
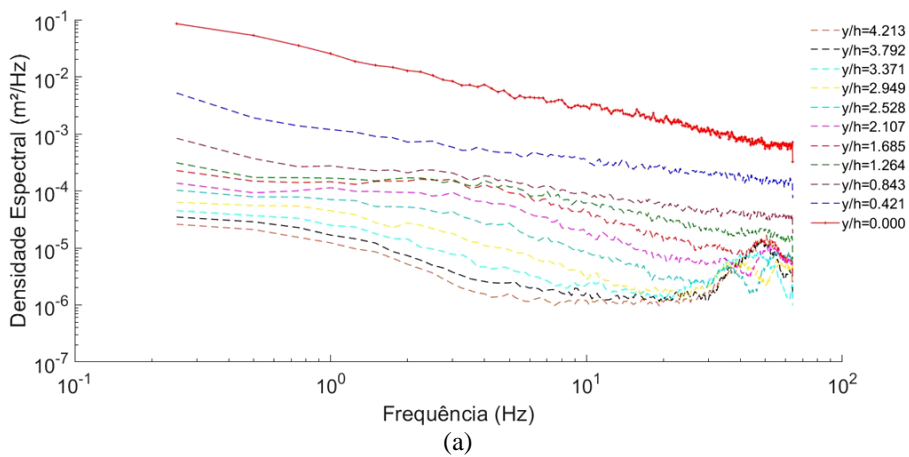


Figura 97 – Análise de frequências (não adimensionalizada) $Fr_1 = 8,51$; (a) $S=1.0$; (b) $S=1.5$; (c) $S=2.0$ e (d) $S=2.5$.



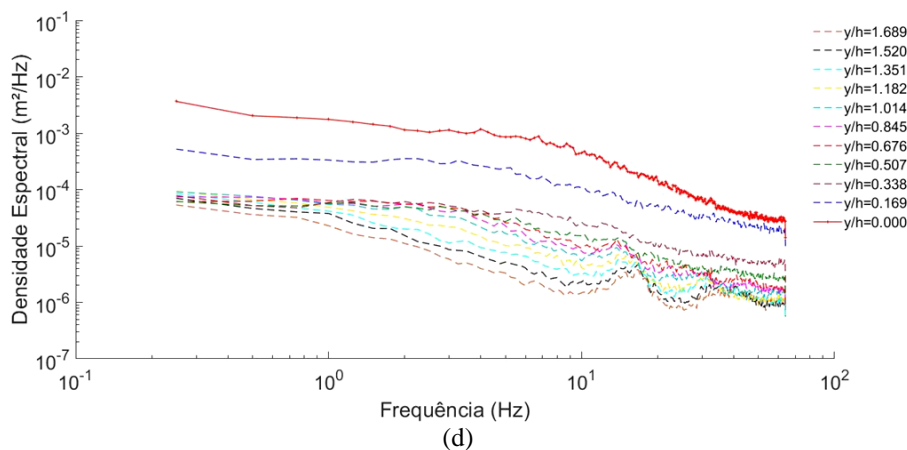
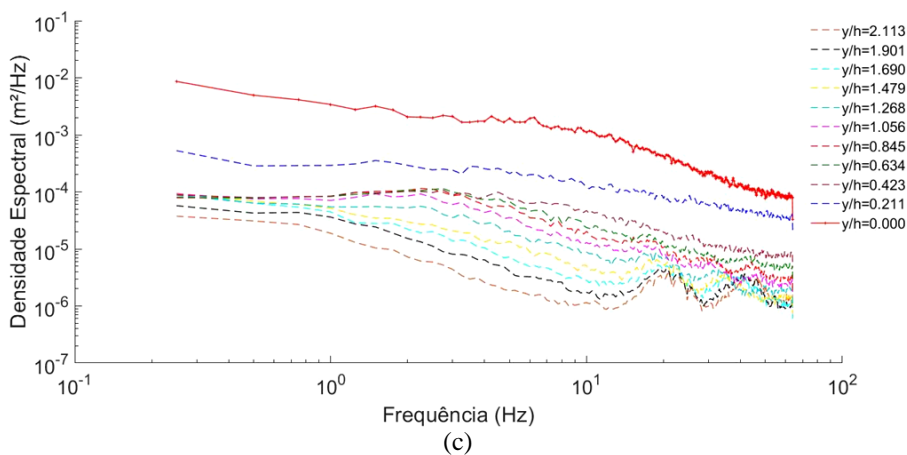
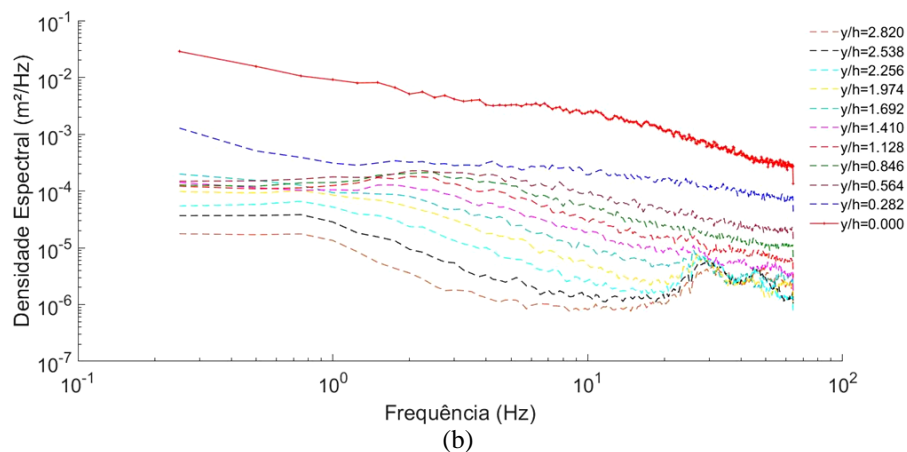


Figura 98 – Análise de frequências (não adimensionalizada) $Fr_1 = 10,35$ (a) $S=1.0$; (b) $S=1.5$; (c) $S=2.0$ e (d) $S=2.5$.

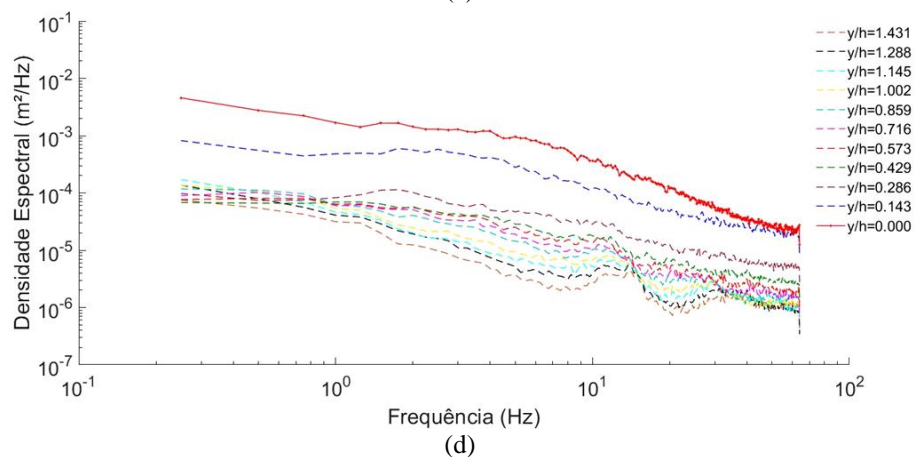
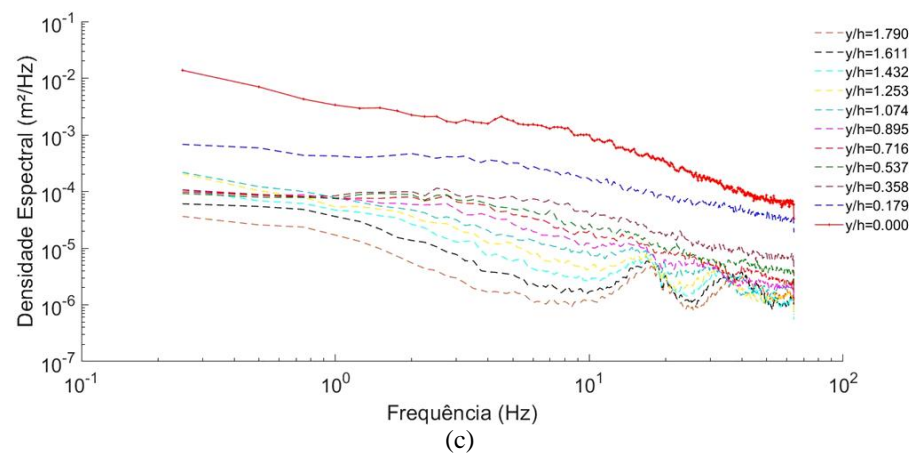
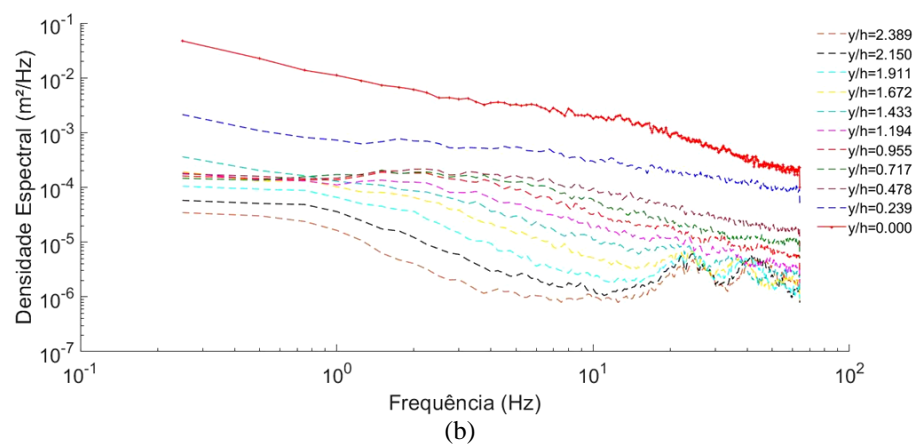
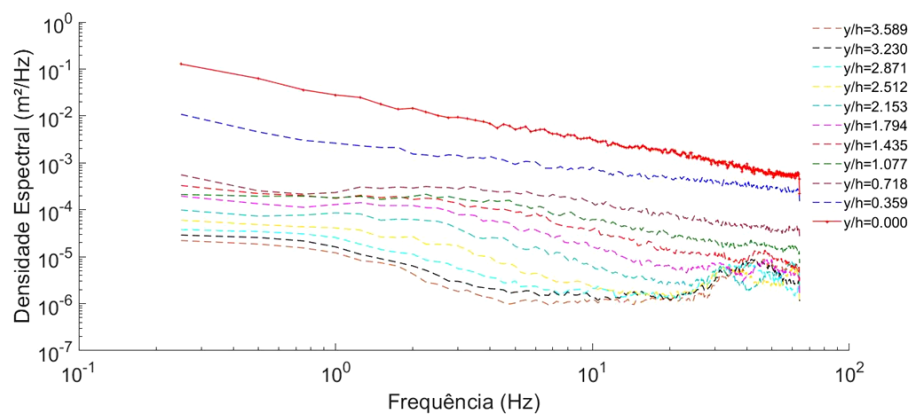


Figura 99 – Análise de frequências (não adimensionalizada) $Fr_1 = 12,12$; (a) $S=1.0$; (b) $S=1.5$; (c) $S=2.0$ e (d) $S=2.5$.

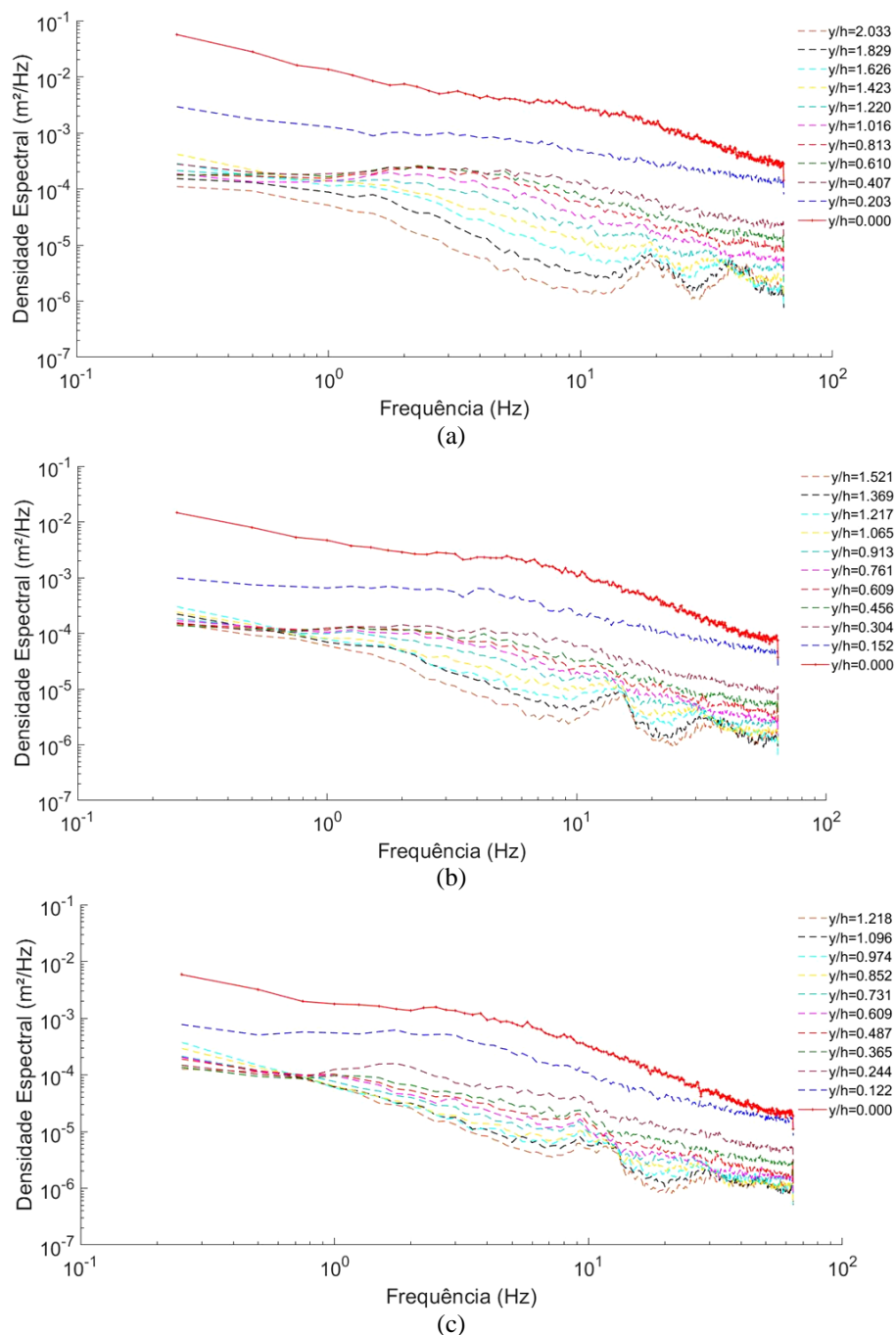


Figura 100 – Análise de frequências (não adimensionalizada) $Fr_1 = 14,23$; (a) $S=1.5$; (b) $S=2.0$ e (c) $S=2.5$.

